



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

LETECKÝ ÚSTAV

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

**AERODYNAMICKÝ NÁVRH NOVÉ GENERACE
PŘÍTLAČNÝCH KŘÍDEL FORMULE SAE**

AERODYNAMIC DESIGN OF NEW GENERATION OF SPOILERS FOR FORMULA SAE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Jánošík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Robert Popela, Ph.D.

BRNO 2016

Zadání bakalářské práce

Ústav: Letecký ústav
Student: **Tomáš Jánošík**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Robert Popela, Ph.D.**
Akademický rok: 2015/16

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Aerodynamický návrh nové generace přitlačných křídel formule SAE

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Přitlačná křídla jsou klíčovým prvkem pro dosažení vysokých výkonů závodního vozu. Velikost generovaného přitlaku a jeho rozložení mezi nápravy vozu jsou zásadní návrhové parametry. Křídla je nutno optimalizovat pro dané požadavky.

Cíle bakalářské práce:

Analýza přitlačných křídel aktuální generace soutěžního vozu Dragon TU Brno Racing. Identifikace oblastí pro zlepšení návrhu, řešení v dané oblasti a aerodynamický návrh křídla pro následující generaci vozu.

Seznam literatury:

Hucho, W.-H.: Aerodynamics of Road Vehicles, ISBN: 978-0-7506-1267-8.

Barlow, J. B., Rae, W. H., Pope, A.: Low-Speed Wind Tunnel Testing, ISBN: 978-0-471-55774-6.

Katz, J.: Race Car Aerodynamics: Designing for Speed (Engineering and Performance), ISBN-13: 978-0837601427.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Hlavný zámer tejto práce je aerodynamický návrh novej generácie prítlačných krídel pre monopost Formule Student. Úvodná časť sa zaoberá náhľadom do využitia prítlačných krídel vo Formuli Student a aerodynamickou analýzou všetkých doterajších monopostov tímu TU Brno Racing využívajúcich prítlačné krídla. Druhá časť práce sa venuje návrhu nového zadného prítlačného krídla a jeho optimalizácií pomocou 2D CFD simulácií.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

Aerodynamika, CFD, Formula Student, Prítlačné krídla

ABSTRACT

The main objective of this thesis is aerodynamic design of new generation of spoilers for Formula Student car. The first part deals with an insight into using of spoilers in Formula Student and aerodynamic analysis of previous TU Brno Racing cars. In the second part, the new rear wing section is designed and optimized using 2D CFD simulations.

KEYWORDS

Aerodynamics, CFD, Formula Student, Inverted wings

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že túto prácu som vypracoval samostatne pod vedením Ing. Roberta Popelu, PhD. s využitím informačných zdrojov uvedených v zozname na konci práce.

Brno

.....

Tomáš Jánošík

POĎAKOVANIE

Týmto chcem poďakovať vedúcemu bakalárskej práce pánovi Ing. Robertovi Popelovi, PhD. za technické rady, námety a konzultácie a všetkým ostatným, ktorý sa hocijakým spôsobom podieľali na tejto práci.

Brno

.....

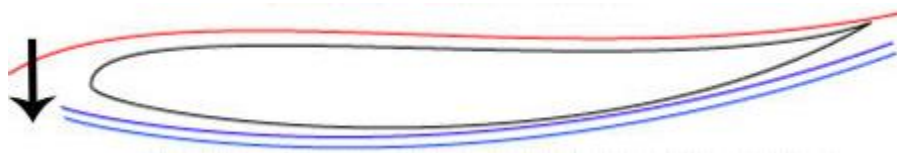
Tomáš Jánošík

OBSAH

Úvod	13
1 Formula Student a Aerodynamika	15
1.1 Vývoj v posledných rokoch	15
1.2 Pravidlá týkajúce sa aerodynamických prvkov	18
2 CFD	19
2.1 Využitie CFD v motoršporte	19
3 Aerodynamická analýza prítlačných krídel monopostov Dragon	21
3.1 Dragon 4 (2014)	21
3.2 Dragon 5 (2015)	24
3.3 Dragon 6 (2016)	28
3.4 Priestor pre zlepšenie	30
4 Aerodynamický návrh novej generácie	31
4.1 Zostavenie účelovej funkcie.	31
4.2 Kalibrácia matematického modelu.	32
4.2.1 Geometria	32
4.2.2 Fyzikálne vlastnosti.	33
4.2.3 Sieť.	33
4.2.4 Výpočet.	36
4.3 Voľba profiláže.	39
4.4 Optimalizačný proces.	42
4.4.1 Voľba parametrov.	43
4.4.2 Vzájomná poloha elementov.	43
4.4.3 Uhol natočenia.	47
4.4.4 Gurneyho klapka.	48
5 Záver	51
Zoznam použitých zdrojov	53
Zoznam použitých skratiek a symbolov	55
Zoznam obrázkov	56
Zoznam tabuliek	58
Zoznam príloh	59
A Výpočet prvej optimalizačnej slučky	61
A.1 Hodnoty $ CI $ jednotlivých kombinácií	61

ÚVOD

V súčasných formách najmä dráhového motor športu málokedy platí, že auto s najväčším motorom je najrýchlejšie. Výkon motoru je síce dôležitý na rovných úsekoch tratí ale v zákrutách je aerodynamická efektívnosť vozu tým najpodstatnejším faktorom. Rozhodujúcimi parametrami, ktoré popisujú aerodynamický výkon sú prítlak a odpor. Prítlak môžeme chápať ako silu pôsobiacu nadol, ktorá výrazne ovplyvňuje normálové zaťaženie pneumatík, čo v konečnom dôsledku znamená, že voz dokáže rýchlejšie prechádzať zátky. Najväčšími strojmi prítlaku sú prítlačné krídla a podlaha. Princíp fungovania prítlačných krídel je veľmi jednoduchý (obr. 1).



Obr. 1: Princíp funkcie prítlačného krídla [17]

Ako zo zákona zachovania energie vyplýva, urýchlenie vzduchu na spodnej hrane krídla spôsobuje pokles tlaku. Tlakový rozdiel nad a pod krídlom znamená, že krídlo je tlačené nadol – vytvára prítlak.

Odpor je naopak sila pôsobiaca proti pohybu vozu, ktorá vozidlo brzdí na rovinkách. Pri prilnutom prúde je odpor výsledkom trenia spôsobeného medznou vrstvou. Najväčší odpor je však spôsobený tlakovým rozdielom pred a za monopostom. U prítlačných krídel býva nárast prítlaku vo väčšine prípadov sprevádzaný aj nárastom odporu. Ako výpočetná aerodynamická charakteristika sa i preto používa tiež pomer prítlak/odpor.

Cieľom tejto práce je návrh novej generácie zadného prítlačného krídla monopostu Formula Student/SAE s vyšším prítlakom a pomerom prítlak/odpor aké dosahuje súčasná generácia vozu.

1 FORMULA STUDENT A AERODYNAMIKA

Formula Student alebo Formula SAE je medzinárodná súťaž technických univerzít kde cieľom každého tímu je od základu navrhnuť a skonštruovať závodný monopost daný technickými regulami. Hoci vznik tejto súťaže sa viaže na rok 1978, využívanie aerodynamických prvkov trvá len pár rokov.

1.1 Vývoj v posledných rokoch

Zlom vo vnímaní aerodynamiky nastal v roku 2010, kedy na závode Formula Student Germany zvíťazil jediný tím využívajúci prítlačné krídla s mimoriadnym nárastom. Od tej doby počet monopostov s prítlačnými krídlami rástol. Vzhľadom na fakt, že priemerná rýchlosť na trati Formula Student sa pohybuje okolo 60 km/h tímy aplikovali masívne krídla s čo najväčšou plochou aby maximalizovali prítlačnú silu aj za cenu nárastu odporu.



Obr. 1.1: Monopost z roku 2013 austrálskeho tímu Monash Motorsport [16]

V roku 2014 sa k tímom využívajúcim aerodynamické prvky pridal aj tím, ktorý pôsobí v rámci Fakulty strojného inžinierstva na VUT v Brne. S monopostom Dragon 4 (obr. 1.2) sa tak priblížil k svetovej špičke.



Obr. 1.2: Dragon 4 [14]

V roku 2015 nastala významná zmena v pravidlách. Došlo k obmedzeniu umiestnenia aerodynamických prvkov, čo viedlo k redukcii maximálnej plochy až o jednu tretinu. Tímy tak museli pristupovať k návrhu omnoho dôkladnejšie. U TU Brno Racing to znamenalo väčší dôraz na aerodynamiku a rozšírenejšie využitie CFD simulácií, z čoho nasledovne vznikol Dragon 5 (obr. 1.3).



Obr. 1.3: Dragon 5 [14]

Niektoré tímy zašli ešte ďalej a s cieľom znovu obnoviť prítlačnú silu svoje monoposty takpovediac „ovešali“ krídlami (obr. 1.4).

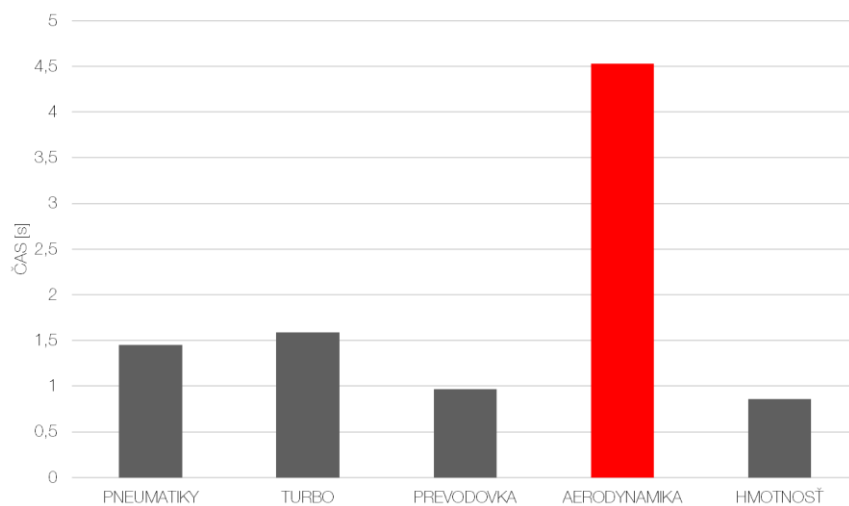


Obr. 1.4: Monopost tímu GFR z roku 2015 [15]

V súčasnosti je už niekoľko týždňov na svete nový Dragon 6 (obr. 1.5), ktorý je z aerodynamického hľadiska evolúciou Dragona 5. Podrobnejšia analýza aerodynamických prvkov na monopostoch tímu TU Brno Racing je prevedená v kapitole č. 3. Pri vývoji Dragona 6 bol dôraz kladený najmä na kvantifikáciu prínosu prítlačných krídel. Pomocou simulácií bolo možné s veľmi spoľahlivou presnosťou určiť vplyv prítlačných krídel na čas na jedno kolo (obr. 1.6).



Obr. 1.5: Dragon 6 [14]



Obr. 1.6: Vplyv jednotlivých komponentov na úsporu času na kolo [8]

Následné fyzické testovanie na trati potvrdilo simulačné odhady a preukázalo, že vďaka prítlačným krídlam môže byť čas na jedno kolo zredukovaný až o 5% v závislosti na type okruhu. Každý tím, ktorý chce napredovať preto musí vo vývoji aerodynamiky neustále pokračovať.

1.2 Pravidlá týkajúce sa aerodynamických prvkov

Ako už bolo spomenuté, každý návrh aerodynamických prvkov musí byť v súlade s danými pravidlami. Tie sa týkajú predovšetkým umiestnenia prvkov respektíve definujú obálku, cez ktorú nemôže žiadna časť aerodynamického prvku presahovať.

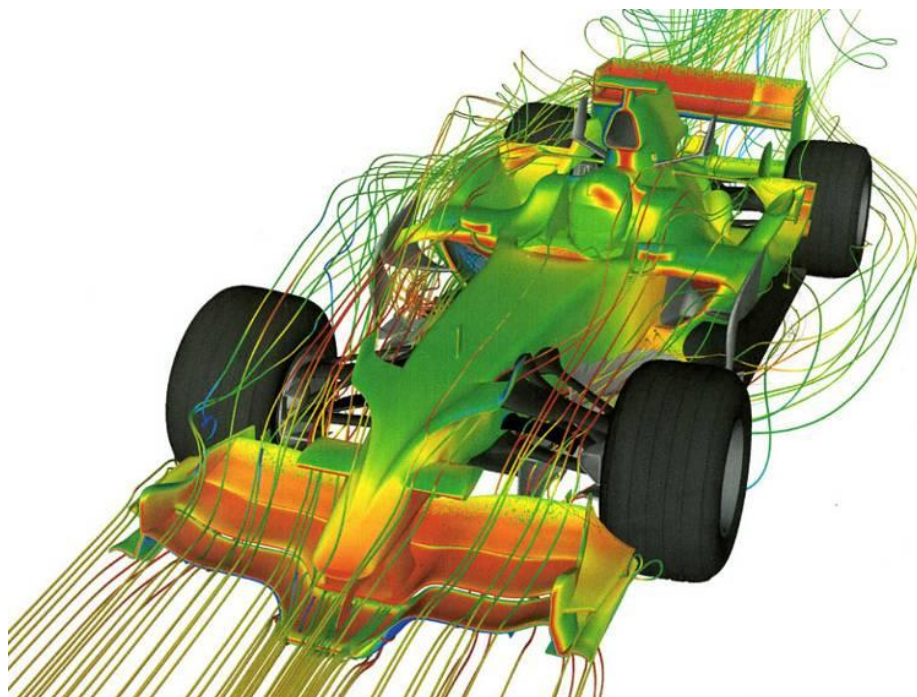
- Poloha – predné aerodynamické prvky
 - Žiada časť aerodynamického prvku nesmie byť:
 - ďalej, než 700mm od predných pneumatík
 - širšia, než vonkajšia bočnica predných pneumatík
 - Žiadna časť kolesa/pneumatiky, ktorá je vyššie ako 250 mm od zeme nesmie byť prekryvaná aerodynamickým prvkom, s výnimkou vertikálnej plochy (bočníc) tenšej než 25 mm.
- Poloha – zadné aerodynamické prvky
 - Žiadna časť aerodynamického prvku nesmie byť:
 - ďalej, než 250 mm od zadných pneumatík
 - širšia, než vnútorná bočnica zadných pneumatík
 - pred plochou, ktorá prechádza prednou stenou podpory opierky hlavy
 - Žiadna časť zadného krídla alebo iného aerodynamického prvku nesmie byť umiestnená vyššie ako 1,2 m nad zemou.
- Poloha – všeobecne
 - Žiadna časť aerodynamického prvku umiestneného medzi kolesami nesmie vychádzať za pomyselnú čiaru spájajúcu vonkajšie bočnice prednej a zadnej pneumatiky a nesmie byť vyššie ako 500 mm od zeme.
- Minimálne zaoblenie hrán
 - Všetky dopredu smerované hrany na krídlach, bočniciach, Gurneyho klapkách a podobne, ktoré môžu ohroziť človeka musia mať minimálny rádius 5 mm pre všetky horizontálne hrany a 3 mm pre všetky vertikálne hrany.
- Využívanie prízemného efektu prostredníctvom odsávanie vzduchu z pod podlahy je zakázané.
- Všetky aerodynamické prvky musia byť riadne uchytené. Uchytenie je kontrolované na technickej kontrole.

2 CFD

Computational fluid dynamics, známejšie pod pojmom CFD je vetvou mechaniky tekutín, ktorá využíva numerických analýz a algoritmov na riešenie problémov týkajúcich sa prúdenia. Jedná sa o simulácie interakcií tekutiny alebo plynu s povrchmi, ktoré sú definované okrajovými podmienkami. Následne sú výsledky týchto simulácií reprodukované rôznymi druhmi vizualizácií.

2.1 Využitie CFD v motor športe

V posledných dvoch desaťročiach sa príchodom super počítačov v značnej miere rozšírilo využívanie CFD najmä v dráhových formách motor športu. CFD umožňuje hlbší pohľad do skúmaného problému. V krátkosti dokáže poskytnúť spätnú väzbu a testovať veľké množstvo variácií skôr ako dôjde k fyzickému testovaniu. Využíva sa k výpočtom nielen externej, ale aj internej aerodynamiky. Jedná sa vždy o prvý krok pri dizajne aerodynamiky vozu.



Obr. 2.1: Vizualizácia prúdnic a tlaku na povrchu monopostu F1 prostredníctvom CFD [11]

3 Aerodynamická analýza prítlačných krídel monopostov Dragon

Tým TU Brno Racing sa v tomto roku účastní už šiestej sezóny medzinárodnej súťaže Formula Student a v zozname tímov využívajúcich aerodynamiku na zlepšenie dynamic-kých vlastností monopostu je tretím rokom. V tejto kapitole sú analyzované prítlačné krídla všetkých doterajších monopostov, ktoré ich využívali. Doteraz jediným prostriedkom pre návrh aerodynamiky bolo CFD. V tomto roku je prvýkrát súčasťou i meranie v aerodynamickom tuneli.

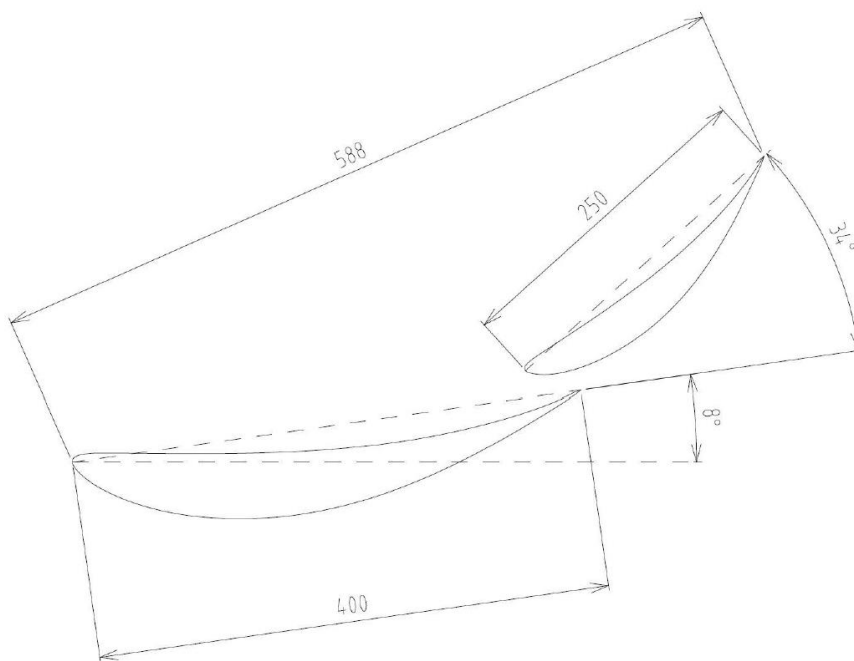
3.1 Dragon 4 (2014)

Dragon 4 (obr. 3.1) ako prvý využíval prítlačné krídla. Keďže nikto z tímu nemal v tej dobe skúsenosti v tejto oblasti, cieľom pri jeho navrhovaní bolo najmä zoznámiť sa so základnými princípmi využitia aerodynamiky v motor športe a získať vedomosti aplikovateľné do ďalších monopostov. Tím sa prvýkrát zoznamoval s CFD takže nedošlo k významnej optimalizácii. Napriek tomu, hlavne kvôli veľkým povoleným plochám prítlačných krídel, bol pozitívny vplyv aerodynamických prvkov na trati znateľný.

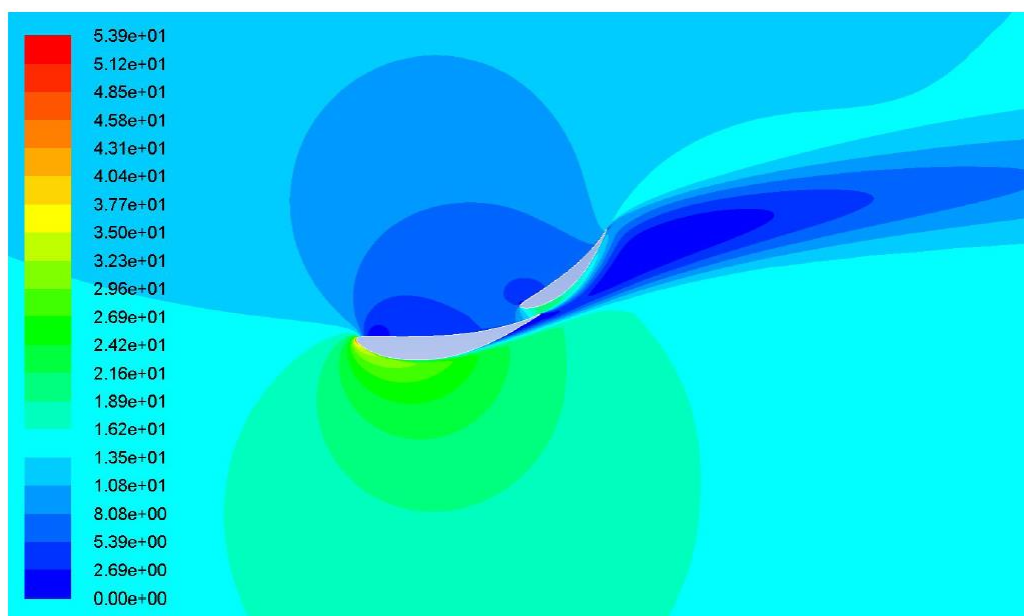


Obr. 3.1: Aerodynamické prvky Dragona 4 [9]

Dragon 4 využíva dvojprvkovú konfiguráciu predného i zadného krídla s profilmi NACA CH10 (obr. 3.2). Tento profil bol zvolený z internetovej databáze vzhľadom na požiadavky t. j. vysoký prítlak pri nízkom Reynoldsovom čísle.



Obr. 3.2: Geometria krídel monopostu Dragon 4 [3]



Obr. 3.3: Rýchlostné pole v okolí krídla [3]

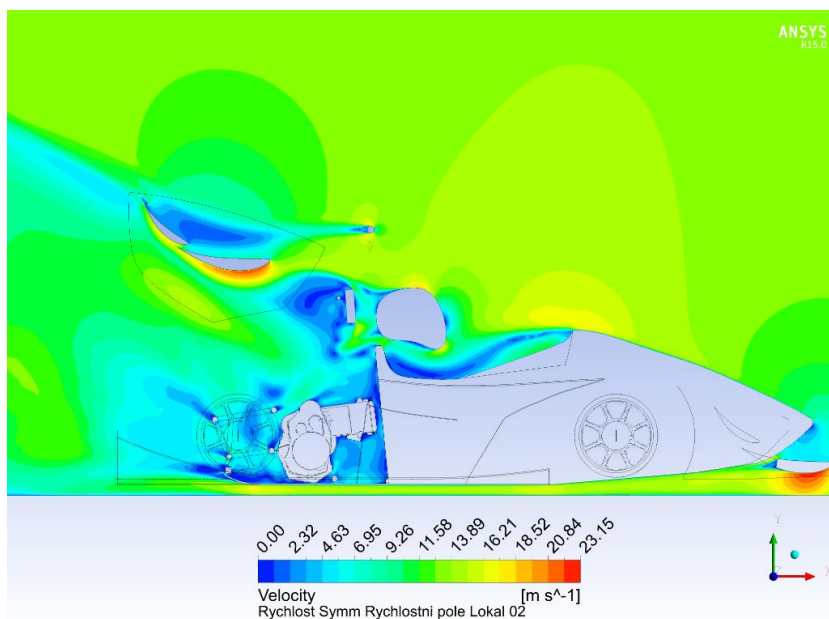
Z obr. 3.3 je vidieť, že zvolená konfigurácia nebola zďaleka ideálna. Keďže sa jedná o profil s veľkým zakrivením, pri 8° natočenia už dochádza k separácii prúdenia na podtlakovej (spodnej) hrane hlavného elementu. V kombinácii s nesprávnou vzájomnou polohou elementov, je funkcia druhého elementu výrazne zredukovaná, čo vidieť aj na malom rozpätí plochy nízkeho tlaku (vyskej rýchlosti) pod druhým elementom.

Predné krídlo bolo jednoduché, s tvarom vysunutého profilu. V stredovej časti bola vyrezaná diera na nos (obr. 3.4).



Obr. 3.4: Predné krídlo Dragona 4 [8]

Prevedený bol aj výpočet zjednodušenej geometrie celého monopostu, ktorý odhalil ďalšie nedostatky. Najväčšou bolo zrejme umiestnenie predného krídla. V oblasti jeho stredovej časti (pri nose) dochádzalo k vysokému nárastu vztlaku a odporu keďže vzduch do nosu prudko narážal (obr. 3.5)



Obr. 3.5: Rýchlostné pole v rovine symetrie monopostu [8]

Ako už bolo spomenuté, dostupnosť CFD bola v tej dobe u tímu minimálna a preto už nebola možnosť prúdenie pozdĺž celého monopostu vzhľadom na výsledky simulácie optimalizovať. Bolo potreba poučiť sa z nováčikovských chýb.

Tím však napredoval a aj vďaka aplikácii prítlačných krídel sa výrazne posunul vo svetovom rebríčku. Tento úspech znamenal odhodlanie posunúť aerodynamiku ďalšieho monopostu o úroveň vyššie.

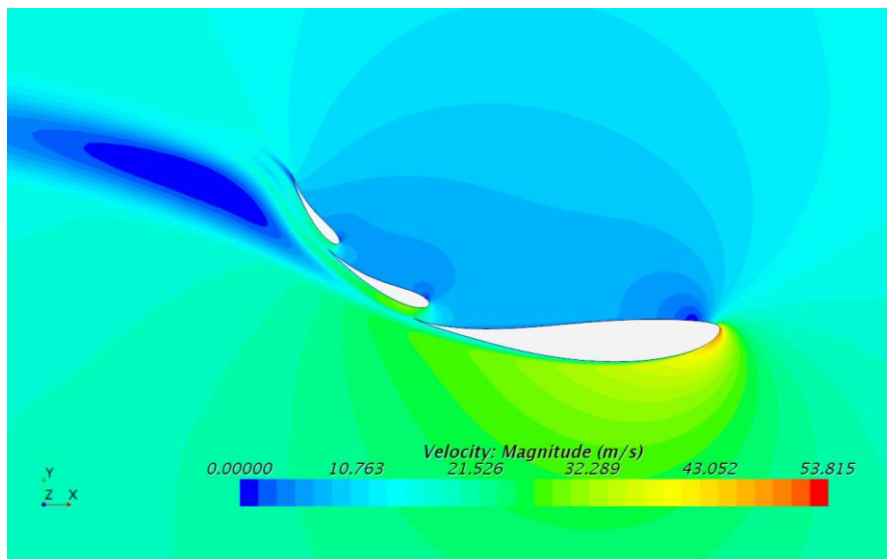
3.2 Dragon 5 (2015)

V roku 2015 došlo k významnej zmene pravidiel a k redukcii maximálnej povolenej plochy umiestnenia aerodynamických prvkov. Z toho dôvodu bolo nutné k návrhu pristúpiť omnoho dôkladnejšie, aby došlo minimálne k znovuzískaniu prítláčnej sily. Toto, ako aj poučenie sa z chýb z Dragona 4 bolo jedným z cieľov pri návrhu Dragona 5 (obr. 3.6).



Obr. 3.6: Aerodynamické prvky Dragona 5 [9]

Pri návrhu krídel boli ako prvé využité opäť 2D simulácie, na základe ktorých bol zvolený koncept s tromi elementami, tentokrát s profilmi Benzing¹. Na obr. 3.6 je zobrazené rýchlostné pole v okolí 2D sekcie zadného krídla. Je na ňom zrejmé výrazné zlepšenie v porovnaní s Dragonom 4, čomu odpovedal a aj výrazne vyšší koeficient prítlaku.



Obr. 3.7: Rýchlostné pole v okolí 2D sekcie zadného krídla

¹ Enrico Benzing bol taliansky inžinier, návrhár profilov krídel určených priamo pre motor šport. Jeho krídla sa využívali v priebehu 80. rokov minulého storočia vo Formule 1. [<http://www.benzing.it/>]

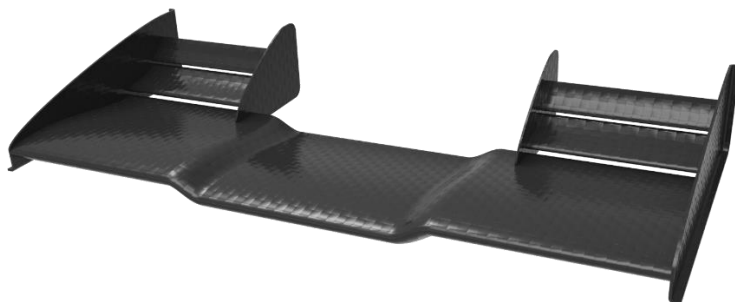
Väčší dôraz bol kladený aj na uchytenie zadného krídla. Uchytenie vzpernými tyčkami na monoposte Dragon 4 malo za následok rozrušenie prúdenia na podtlakovej strane krídla a zníženie prítlačnej sily. Z toho dôvodu bolo krídlo na Dragona 5 uchytené zhora a podtlaková strana, ktorá je veľmi citlivá na rozrušenie, ostala „čistá“ (obr. 3.7).



Obr. 3.8: Zadné krídlo Dragona 5 [8]

Rozmerné bočnice lepšie izolovali oblasť nízkeho tlaku pod krídlom a tiež izolovali krídlo od úplavu od zadných kolies.

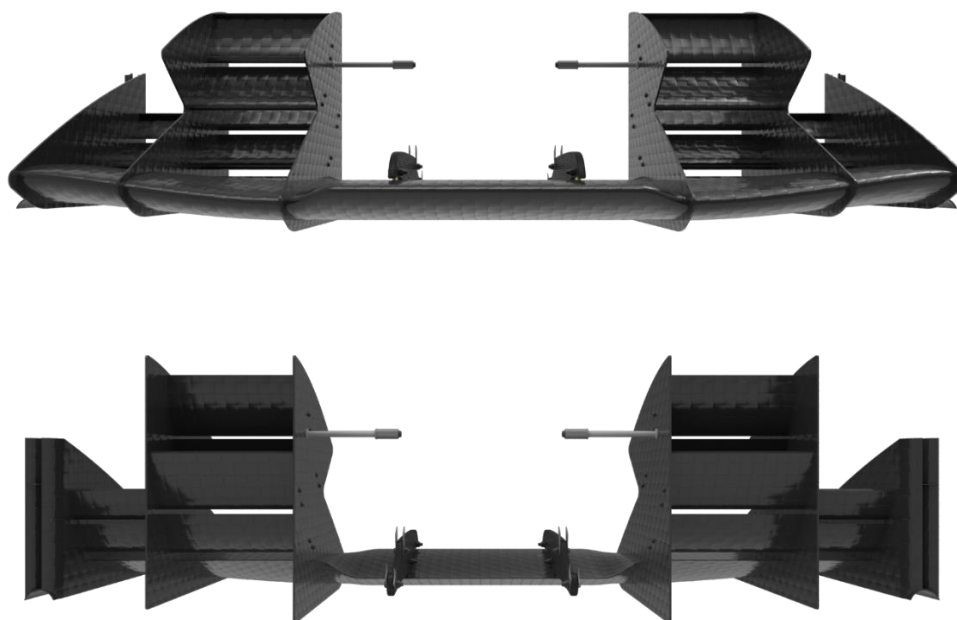
Najväčšia pozornosť bola daná prednému krídlu, keďže to má dominantný vplyv na aerodynamiku celého monopostu. Bolo umiestnené čo najviac vpredu, respektíve čo najďalej od predných kolies. Hlavný element mal mieniaci sa prierez (obr. 3.8). Nižšia stredová časť krídla mala vytvoriť väčšiu medzeru medzi krídlom a nosom a dostať tak viac vzduchu podlahu.



Obr. 3.9: Prvá iterácia predného krídla Dragona 5 [8]

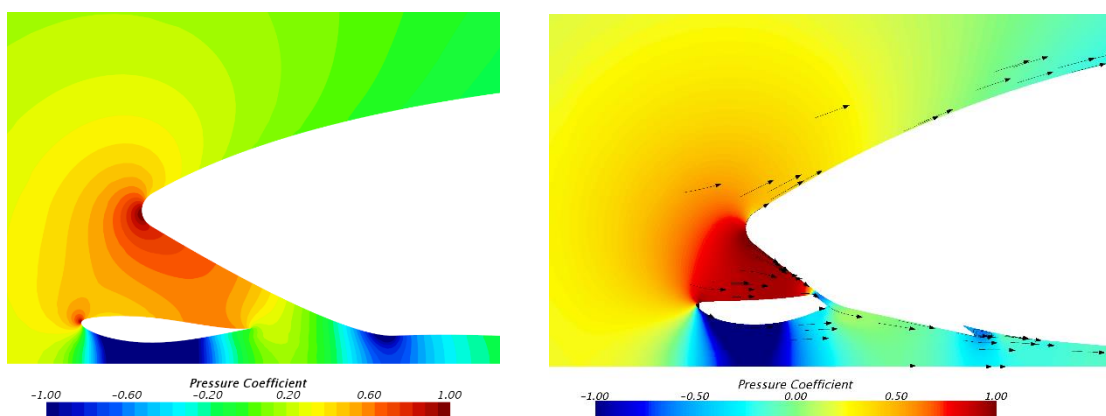
S krídlom uvedeným na obrázku 3.8 bolo podľa simulácií však až 70% prítlaku orientovaných na zadnej náprave, čo by bolo nevhodné z hľadiska ovládateľnosti monopostu. Dizajn predného krídla tak bolo nutné upraviť.

Keďže pravidlá obmedzovali maximálnu výšku predného krídla iba pred kolesom, v priestore medzi nosom a kolesom mohla byť plocha krídla väčšia. Krídlo tak prešlo množstvom zmien a optimalizácií až nakoniec vzišlo k finálnej podobe (obr. 3.9).



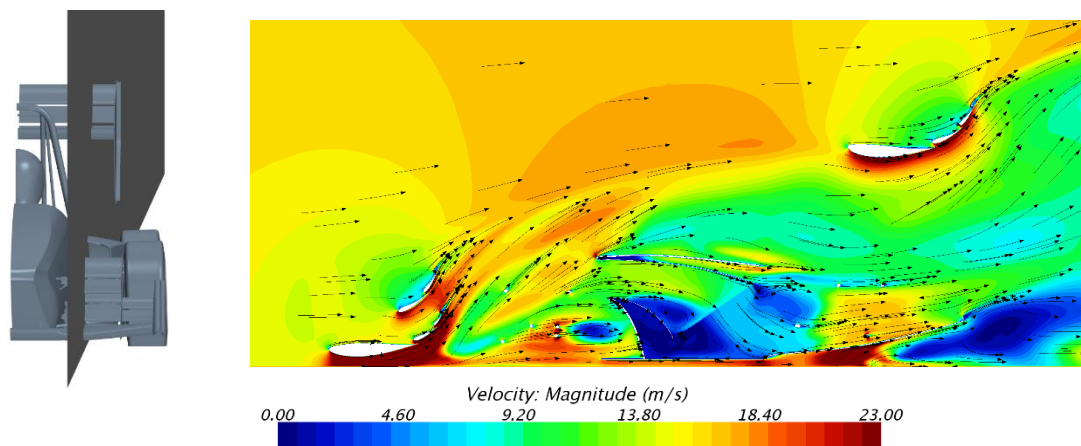
Obr. 3.10: Finálna podoba predného krídla Dragona 5 [8]

Ako je vidieť na obr. 3.9 prierez hlavného elementu sa plynule mení. V stredovej časti je natočenie nulové, čo v spolupráci s vyššie umiestnenou špičkou nosa pomáha k prechodu väčšieho množstva vzduchu pod podlahu, a to má pozitívny vplyv na jej funkciu. V tejto oblasti tak došlo k výraznému zlepšeniu oproti Dragonovi 4 (obr. 3.10).



Obr. 3.11: Pole koeficientu tlaku v oblasti nosu v rovine symetrie (vľavo Dragon 5) [9]

Čo sa však nepodarilo ideálne, bolo nasmerovanie prúdenia na zadné krídlo. Veľký uhol natočenia predného krídla v kombinácii s druhým poschodím elementov odkláňali prúdenie príliš nahor (obr. 3.11). To oberalo zadné krídlo o efektivitu.



Obr. 3.12: Rýchlostné pole vo vyznačenom reze

Výsledkom toho bolo nerovnomerné rozloženie prítlaku na nápravách. Podľa simulácií väčšina prítláčnej sily smerovala na prednú nápravu. Všeobecne sa pri zadnom náhone považuje za správne smerovať prítlak mierne na zadnú nápravu. Auto tak nie je pretáčavé a chová sa stabilne pri bočnom vetre. Úprava balansu medzi nápravami, ako aj možnosť tento balans nastavovať ostali tak cieľmi do ďalšej sezóny.

V tab. 3.1 je porovnanie základných aerodynamických veličín monopostov Dragon 4 a 5. Je vidieť, že napriek redukcii referenčnej plochy sa podarilo zvýšiť koeficient prítlaku a taktiež výrazne klesol odpor.

Tab. 3.1: Porovnanie aerodynamických veličín Dragona 4 a 5

		Dragon 4	Dragon 5
Referenčná plocha	A_{ref}	1,302	1,103
Koef. vztlaku - predok	Cl_F	-1,09	-1,59
Koef. vztlaku - zadok	Cl_R	-1,55	-1,11
Vyváženie na zadok	Cl_R/Cl	0,59	0,41
Koef. vztlaku	Cl	-2,64	-2,69
Koef. odporu	Cd	1,24	1,14
Pomer prítlak/odpor	Cl/Cd	2,13	2,37

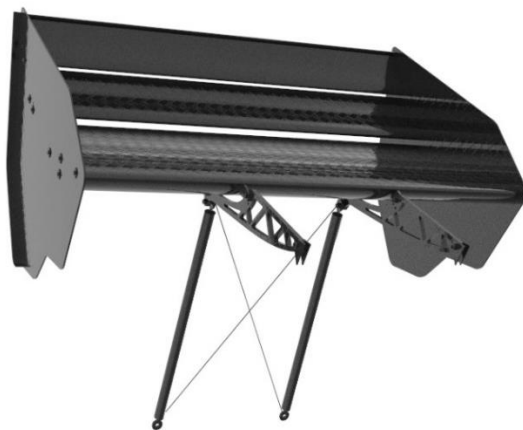
3.3 Dragon 6 (2016)

Na základe spätnej väzby z dizajn prezentácie² zo závodov bolo nutné pre tento rok pozmeniť priority pri návrhu aerodynamiky monopostu. V predošlých dvoch sezónach neboli výsledky z CFD simulácií nijak validované, a hoci tento nástroj ostáva prvým krokom pri návrhu aerodynamických prvkov, získané výsledky sú iba odhady. Preto boli krídla monopostu oproti predchodcovi iba ľahko pozmenené. Profiláž ostala rovnaká, dôraz bol kladený na zlepšenie rozloženia prítlaku, možnosť jeho nadstavovania.



Obr. 3.13: Dragon 6 [14]

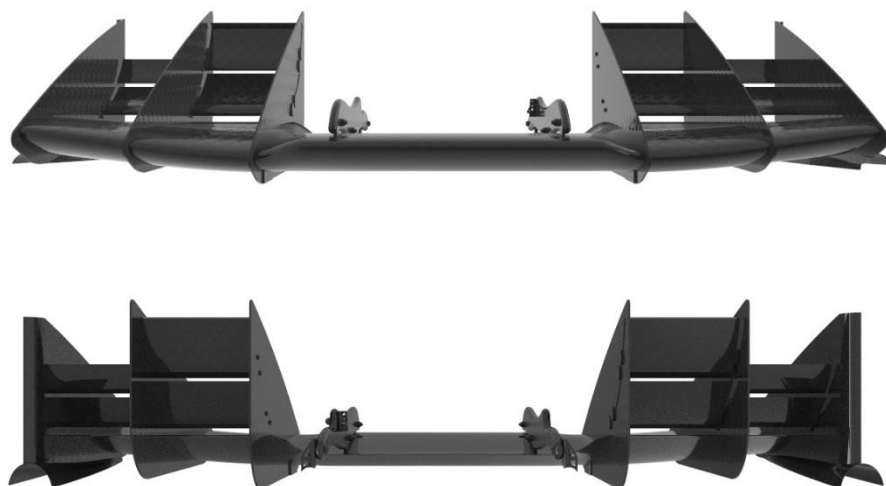
Zadné krídlo sa dočkalo drobných úprav (obr. 3.14). Kvôli výrazným vibráciám na predošlom aute bolo prepracované uchytenie aj za cenu rozrušenia podtlakovej strany. Pozmenené boli aj bočnice. Zbytočná plocha pred profilom bola orezaná z dôvodu lepšieho prístupu prúdenia na hlavný element pri zatačaní.



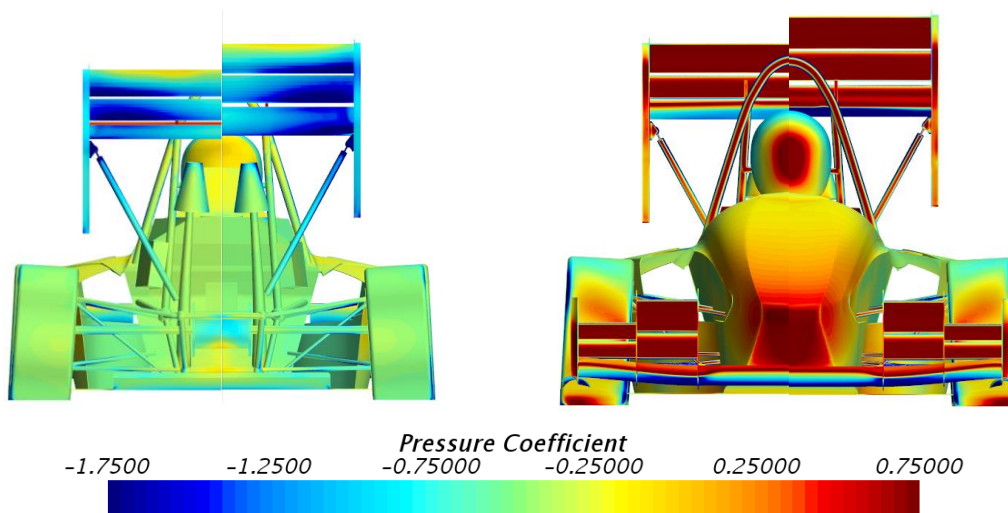
Obr. 3.14: Zadné krídlo Dragona 6

Z predného krídla bolo odstránené druhé poschodie elementov (obr. 3.12), vďaka čomu sa zlepšilo rozváženie prítlaku medzi nápravami. Ideou bolo rozloženie regulovať natáčaním zadného krídla (obr. 3.13).

² Dizajn prezentácia je jednou zo statických disciplín. Tím tu obhajuje technický návrh vozu pred odbornou porotou.



Obr. 3.15: Predné krídlo Dragona 6



Obr. 3.16: Porovnanie tlaku na povrchu monopostu s krídlom v 0° (ľavá polka) a 8°

Ako vidieť z obr. 3.13 pri krídle natočenom o 8° ešte nedochádza k separácii a na spodnej strane krídla vzniká výraznejšie pole podtlaku. Na základe simulácií došlo po natočení zadného krídla k posunu prítlaku viac na zadnú nápravu (tab. 3.2)

Tab. 3.2: Rozloženie prítlaku na nápravách

Uhol natočenia zadného krídla	0°	8°
Podiel prítlaku na zadnej náprave	47%	55%

Tieto výsledky sú tak dobrým odrazovým mostíkom pre reálne testovanie na trati, kde bude možné nastaviť balans vhodný pre danú trať a podmienky.

Aerodynamický vývoj monopostu Dragon 6 stále trvá. Optimalizuje sa podlaha monopostu. Taktiež prebieha meranie v aerodynamickom tuneli, kde sú validované výsledky z CFD simulácií. V pláne je aj tenzometrické meranie aerodynamických síl na trati.

3.4 Priestor pre zlepšenie

Potenciál súčasných krídel je už naplnený, najmä z hľadiska profilov. Ak chce tím pokračovať v dobrých výkonoch, treba od základu pristúpiť k návrhu nových. K zvýšeniu prílačnej sily je možné dospieť aplikovaním profilov s väčším zakrivením, plochou a vhodnou optimalizáciou. Týmto sa zaoberá ďalšia kapitola.

4 NÁVRH KRÍDLA NOVEJ GENERÁCIE

Táto kapitola sa venuje voľbe nových profilov a optimalizácií 2D sekcie zadného prítlačného krídla pomocou CFD pre nasledujúcu generáciu monopostu Dragon 7.

4.1 Zostavenie účelovej funkcie

Zostavením účelovej funkcie sú definované ciele optimalizácie. Vzhľadom na požiadavky monopostu Formule Student je primárnym cieľom optimalizácie 2D sekcie zadného prítlačného krídla maximalizácia $|Cl|$ za súčasného zvýšenia $|Cl|/Cd$ v porovnaní so súčasným krídlom.

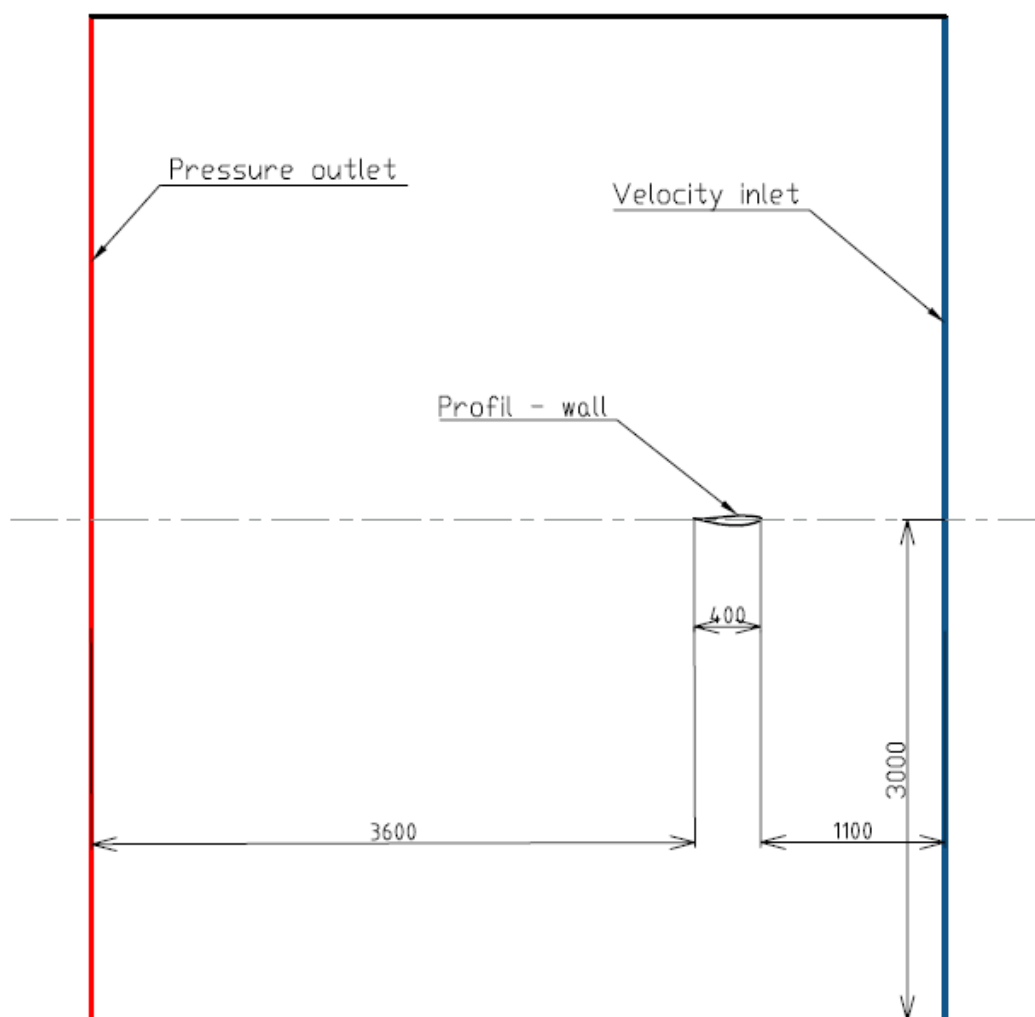
Obmedzenie sa v tomto prípade týka maximálnej povolenej výšky umiestnenia zadného krídla t. j. 1,2 m a maximálnej vzdialenosti od zadných kolies, ktorá činí 250 mm. Spodná hranica umiestnenia krídla síce nie je daná, avšak keďže krídlo funguje najefektívnejšie ak je čo najvyššie (v čistom prúde), táto hranica bude rozumne nadstavená.

4.2 Kalibrácia matematického modelu

Skôr ako je možné pristúpiť k samotnému návrhu a optimalizácii krídla, je nutné nastaviť parametre výpočtového modelu a overiť si, či je možné so zvoleným nastavením získať výsledky odpovedajúce realite. Kalibrácia je vykonaná na profile NACA 63(2)-615. Tento profil je využívaný na súčasnej generácii závodného monopostu Dragon. CFD výpočty prebiehajú v prostredí STAR-CCM+ 11.

4.2.1 Geometria

V prvom rade je nutné zadefinovať si geometriu „virtuálneho tunela“ – domény a k jednotlivým plochám domény priradiť okrajové podmienky (obr. 4.1).



Obr. 4.1: Doména a priradené okrajové podmienky

Rozmery domény sú zvolené tak, aby vzdialenosť stien od profilu neovplyvňovala tlakové pole a boli tak nasimulované podmienky experimentu.

4.2.2 Fyzikálne vlastnosti

Nadstavenie fyzikálnych vlastností výpočtu je uvedené v tabuľke .

Tab. 4.1: Nadstavenie fyzikálnych vlastností

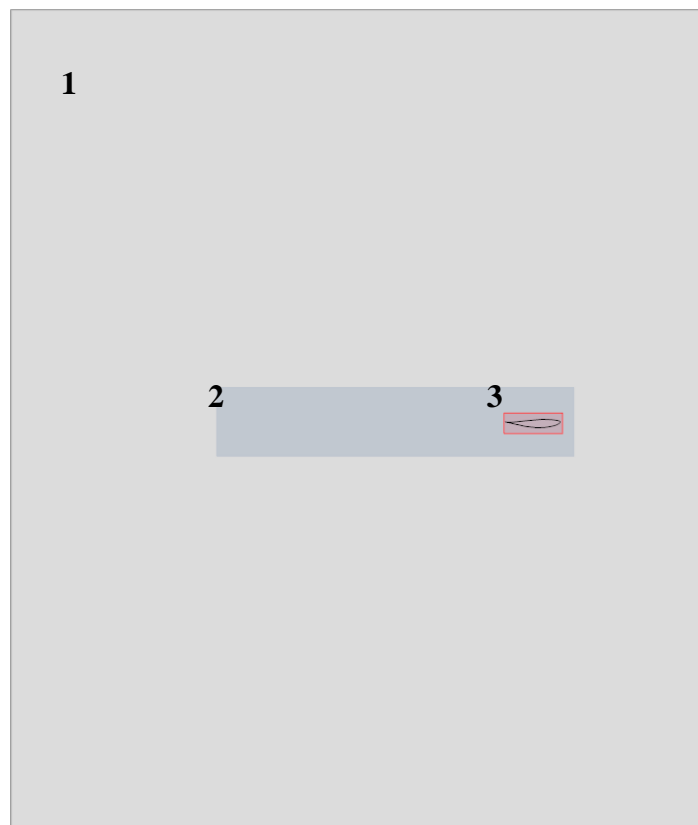
Priestor	2D
Model	Coupled
Stavová rovnica	Konštantná hustota
Turbulentný model	K-Epsilon

Reynoldsovo číslo má pri priemernej rýchlosti, ktoré dosahujú vozy Formula Student t. j. 60 km/h (16,7 m/s) veľkosť :

$$Re = \frac{\rho V_{\infty} c}{\mu} = \frac{1,23 * 16,7 * 0,4}{1,79 * 10^{-5}} = 459\,016 \quad (4.1)$$

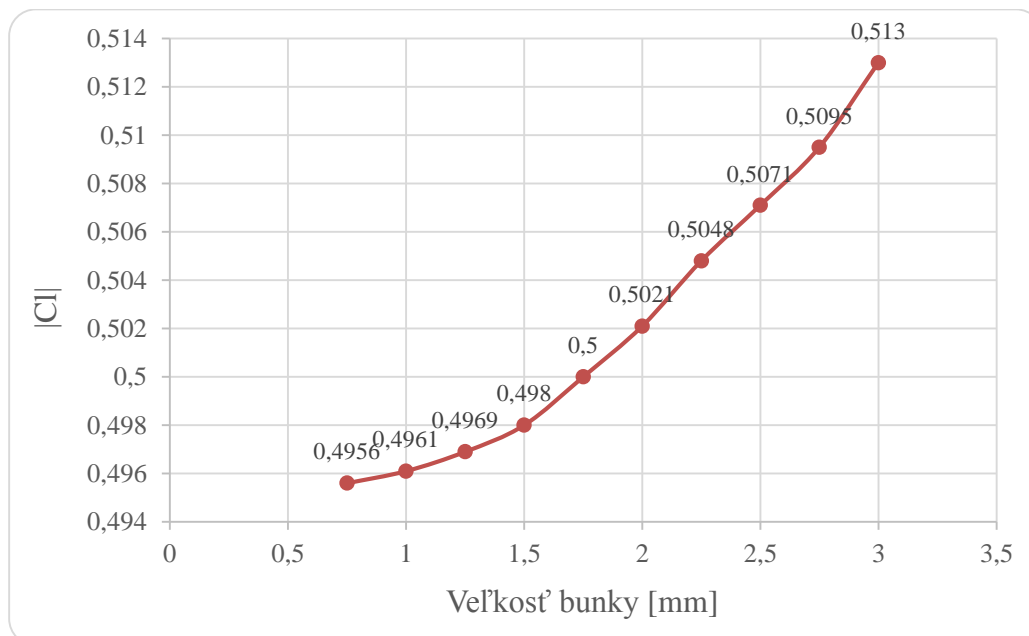
4.2.3 Sieť

Ďalším krokom je tvorba siete. Sieť je rozdelená na tri oblasti (obr. 4.2): blízke okolie profilu – **3**, kde je sieť najdetailnejšia, oblasť za profilom kvôli zachyteniu profilom rozrušeného prúdenia - **2** a ďaleké okolie - **1**, kde sú dostačujúce veľmi veľké bunky.



Obr. 4.2: Rozdelenie siete

Najkritickejšou oblasťou je blízke okolie profilu a práve tu je nutné venovať charakteru siete veľkú pozornosť. Treba nájsť správnu veľkosť bunky, pri ktorej zmenšovaní nebude dochádzať ku zmenám výsledku, respektíve bude zmena výsledku prijateľná. Taktiež je nutné dbať na výpočtový čas, preto by sieť nemala byť zbytočne detailná. Z týchto dôvodov je veľkosť buniek v tejto oblasti optimalizovaná. Za počiatočnú je zvolená veľkosť 3mm. Táto hodnota je zmenšovaná po krokoch veľkých 0,25mm. Výsledky sú znázornené na obrázku 4.3.

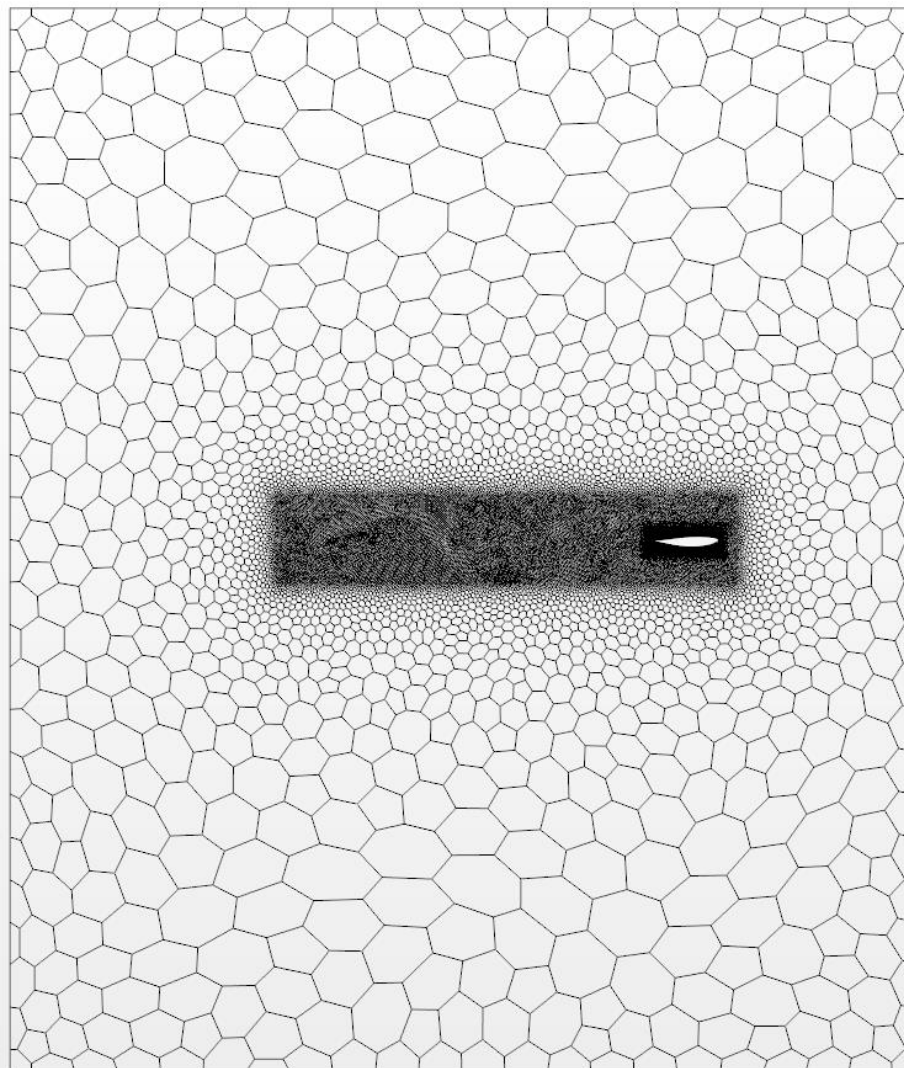


Obr. 4.3: Závislosť výstupnej hodnoty $|CI|$ na veľkosti bunky v blízkom okolí profilu

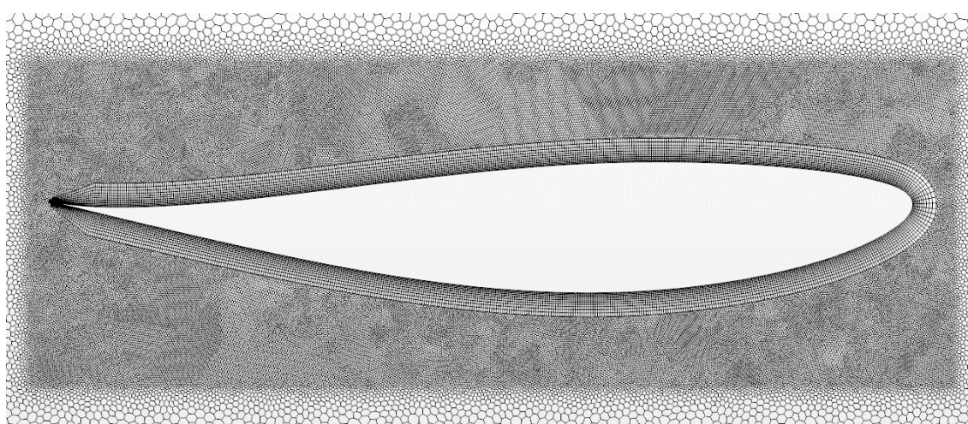
Z obr. 4.3 je zrejmé, že sieť v blízkom okolí profilu s bunkou o veľkosti 1mm je dostatočne detailná pretože pri ďalšom zmenšení buniek dochádza k minimálnej zmene výstupnej hodnoty $|CI|$, respektíve je táto hodnota menšia v ráde desiat tisícín. Takáto odchýlka je pri výpočte akceptovateľná. Finálna podoba siete ako aj parametre siete sú zobrazované na obr. 4.4 a v tab. 4.2.

Tab. 4.2: Základné parametre siete

Typ siete	Polygonálna
Veľkosť bunky	
Oblasť 1	200mm
Oblasť 2	10mm
Oblasť 3	1mm
Prizmatické vrstvy	
Počet vrstiev	12
Celková hrúbka	11mm
Rast	1,2



Obr. 4.4: Finálna sieť



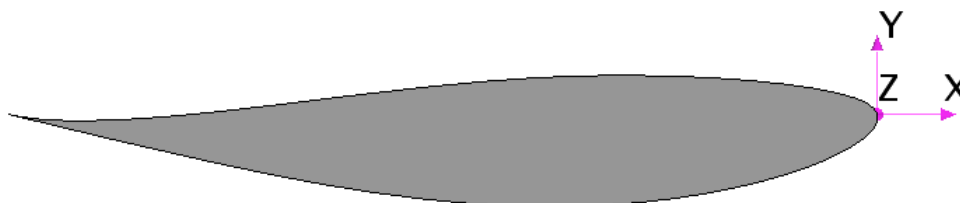
Obr. 4.5: Detail siete v okolí profilu a pohľad na prizmatické vrstvy

Hodnoty y^+ na povrchu profilu sa pohybujú od 30 do 50, čo sú pre daný model turbulencie akceptovateľné hodnoty.

4.2.4 Výpočet

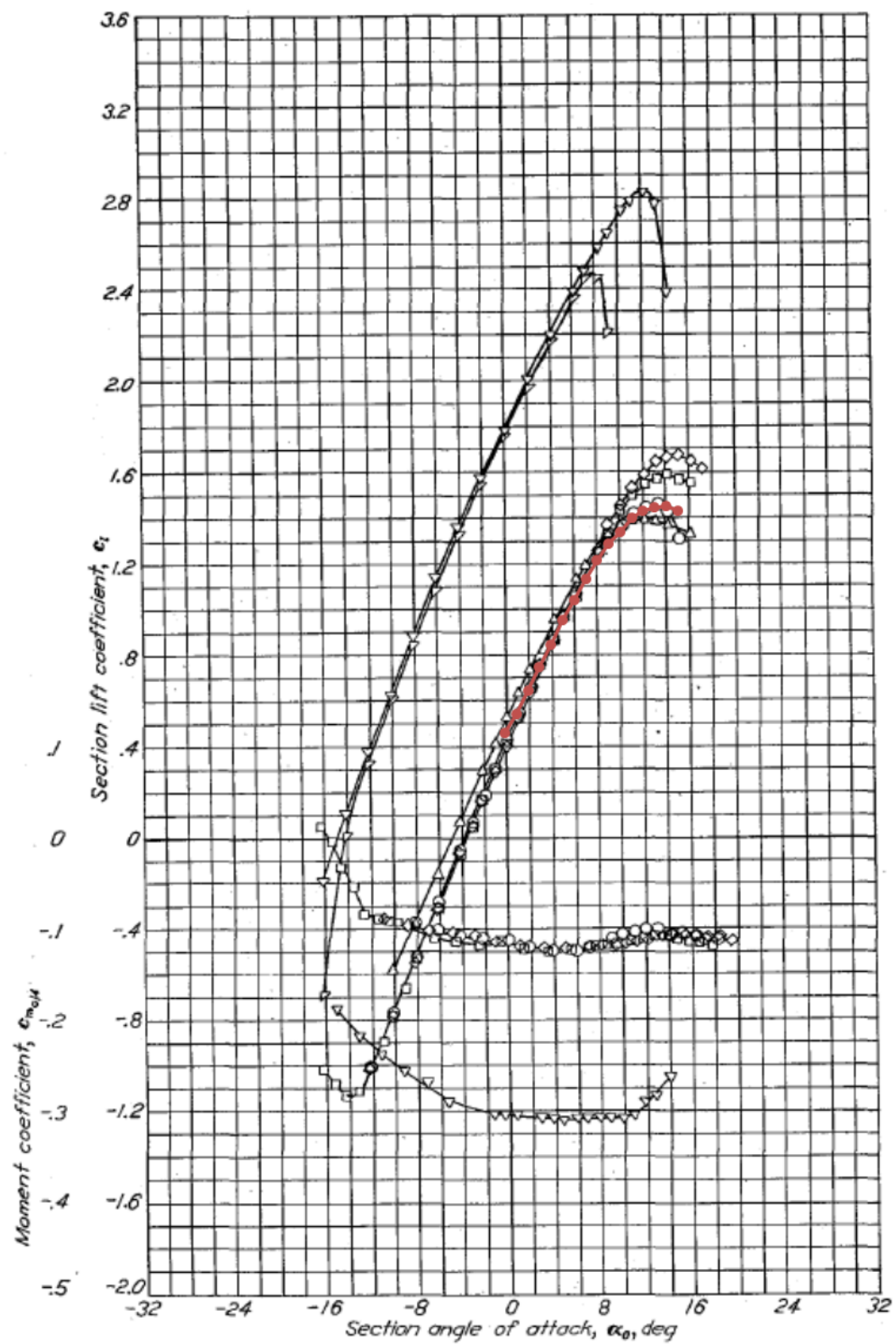
Výstupom samotného výpočtu sú vztlková krivka a polára t. j. dve základné charakteristiky určujúce vlastnosti každého jednotlivého profilu. Výsledky sú porovnané s experimentálne nameranými hodnotami obsiahnutými v dokumente Summary of Airfoil Data [5] z roku 1945.

Aby bolo možné rýchlo meniť uhol natočenia, STAR CCM+ ponúka možnosť zdefinovať si návrhový parameter (v tomto prípade rotáciu) okolo ľubovoľnej osi ľubovoľne vytvoreného súradnicového systému (obr. 4.6). Po zmene hodnoty parametru STAR upravenú geometriu znovu automaticky vysiet'uje.

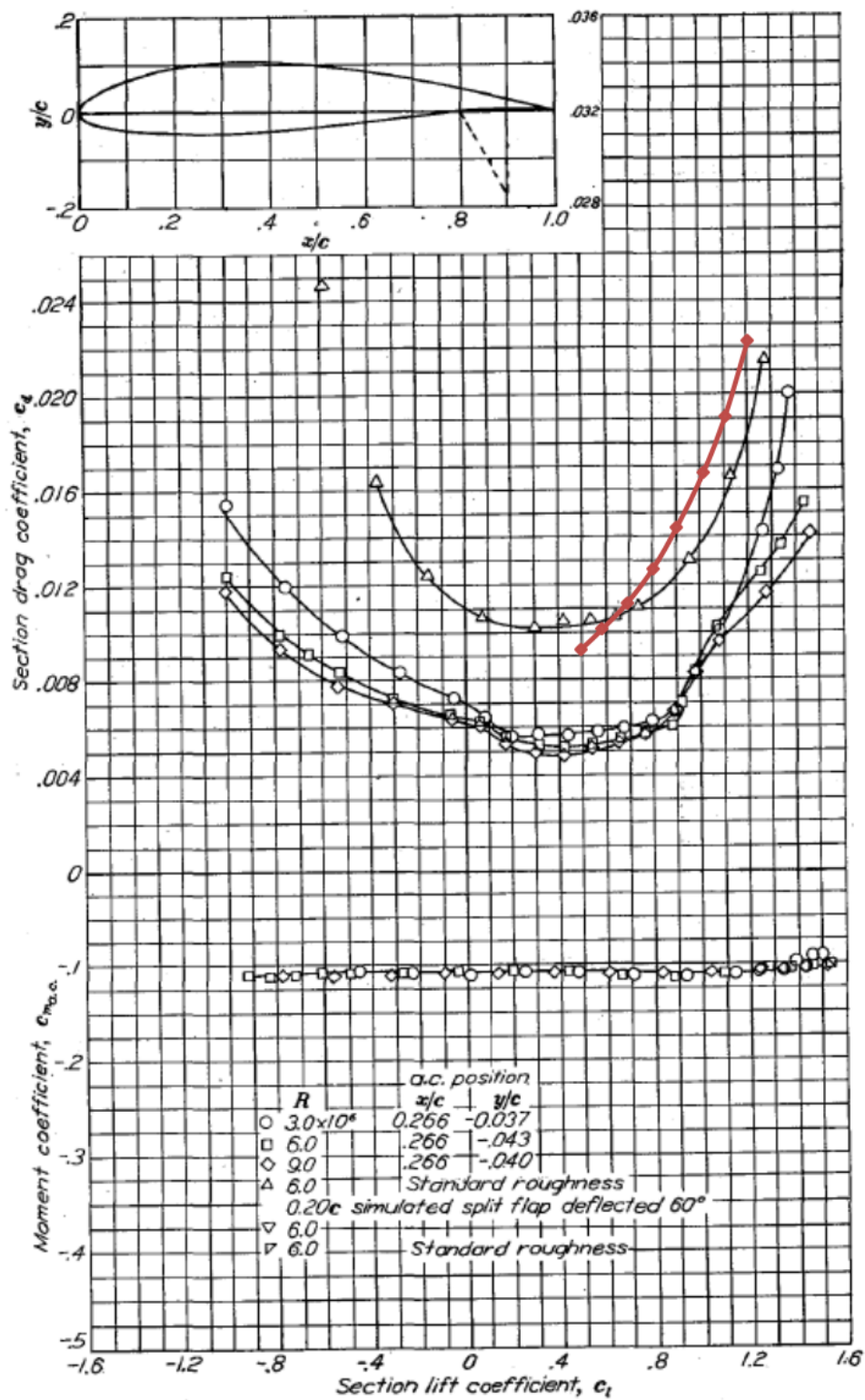


Obr. 4.6: Súradnicový systém priradený k návrhovému parametru – rotácia okolo osi z

Výsledky sú znázornené na obrázkoch 4.7 a 4.8. Vypočítané hodnoty reprezentuje červená krivka. Legenda k výsledkom z tunelového merania je na obrázku 4.8.



Obr. 4.7: Porovnanie vztlakových kriviek [5]

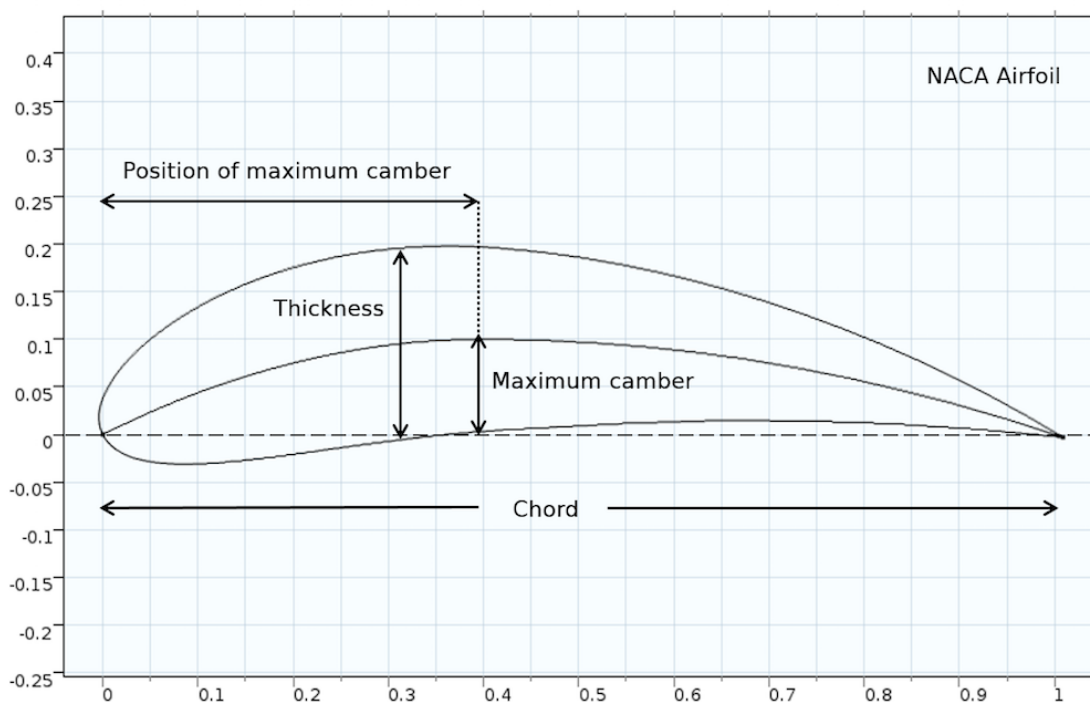


Obr. 4.8: Porovnanie polár [5]

Z obrázku 4.7 je zreteľné, že medzi výpočtom a tunelovým meraním je pri koeficiente vztlaku dosiahnutá veľmi dobrá zhoda pri všetkých uhloch natočenia. Pri poláre (obr. 4.8) sa hodnoty výpočtu a experimentu líšia. Priebeh týchto hodnôt je však porovnateľný. Vzhľadom ku charakteru účelovej funkcie je tento rozdiel akceptovateľný. Pre optimalizáciu je teda definovaný matematický model vhodný.

4.3 Voľba profiláže

Tak ako na posledných dvoch monopostoch Dragon i teraz je zvolený koncept zadného krídla s tromi elementami. Namiesto profilov Benzing, ktoré využívajú Dragon 5 i súčasný Dragon 6, sú na nové krídlo aplikované NACA profily. NACA 4-digit profil je riadený, ako už názov vypovedá, štyrmi tvarovými parametrami (obr. 4.9). Vďaka týmto parametrom ponúka širokú škálu možných tvarov.



Obr. 4.9: Parametre riadiace tvar NACA profilu [7]

Racionálne bol tak zvolený tenký profil s veľkým zakrivením. Jednotlivé parametre profilu a ich hodnoty sú v tab. 4.3. Hodnoty týchto parametrov sú vyjadrené v jednotkách percent z celkovej hĺbky (chord) profilu.

Tab. 4.3: Hodnoty parametrov NACA profilu

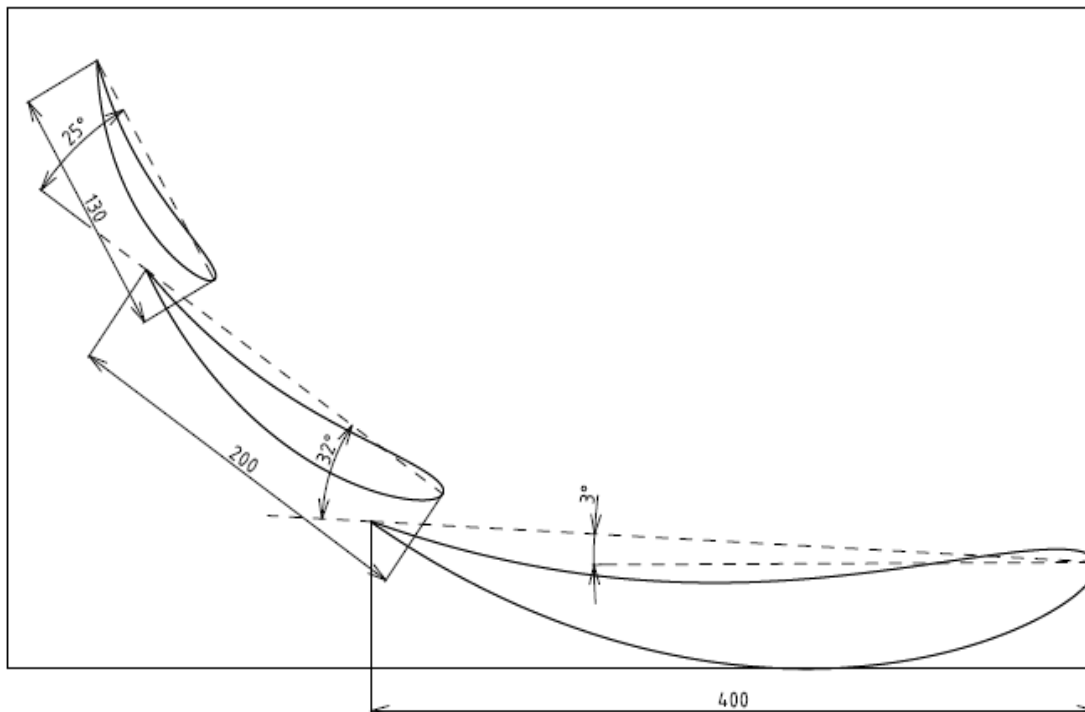
Thickness ³	12
Maximum camber ⁴	9
Position of maximum camber ⁵	50

³ Hrúbka

⁴ Maximálna krivosť

⁵ Poloha maximálnej krivosti

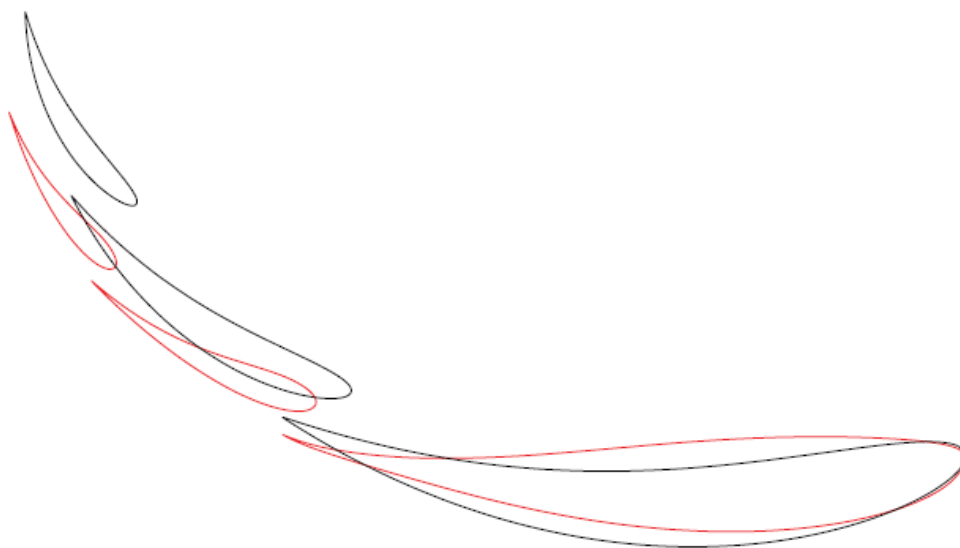
Pri voľbe hĺbky jednotlivých elementov je nutné dbať na pravidlá, ktoré obmedzujú možný priestor umiestnenia zadného krídla. Preto bol vytvorený pomyselný „box“ reprezentujúci priestor povolený pravidlami a hĺbky jednotlivých elementov boli zvolené vzhľadom na toto obmedzenie (obr. 4.10).



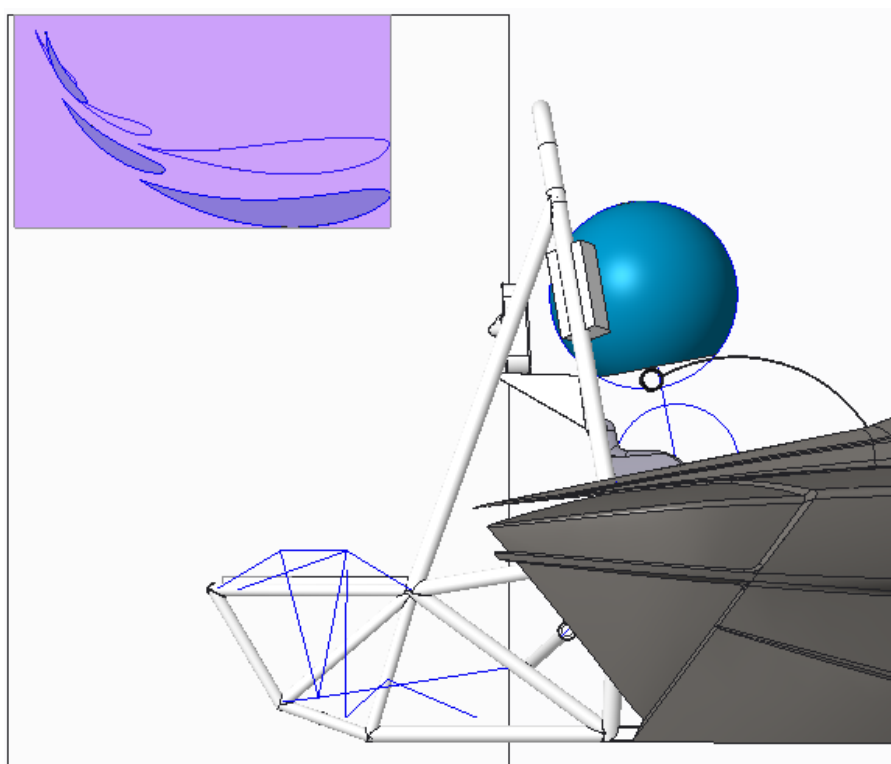
Obr. 4.10: Geometria krídla v boxe danom pravidlami

Horná a ľavá hrana boxu sa priamo vzťahujú k pravidlám a reprezentujú maximálnu povolenú výšku zadného krídla, respektíve maximálnu vzdialenosť krídla od zadného kola. Od týchto hrán je ponechaná určitá rezervná vzdialenosť kvôli predpokladu čiastočnej zmeny polohy jednotlivých elementov pri optimalizácii.

Keďže na krídlo smeruje najčistejšie prúdenie ak sa nachádza čo najvyššie, spodná a pravá hrana boxu sú umiestnené aby krídlo fungovalo čo najefektívnejšie ak vezmeme do úvahy rozrušenie prúdenia celým monopostom. Celkovo však tento návrh uvažuje s nižšie umiestneným krídlom oproti súčasnému monopostu kvôli väčšej ploche. Na obrázkoch 4.11 a 4.12 je porovnanie profiláže nového návrhu a súčasnej generácie.



Obr. 4.11: Porovnanie profiláží



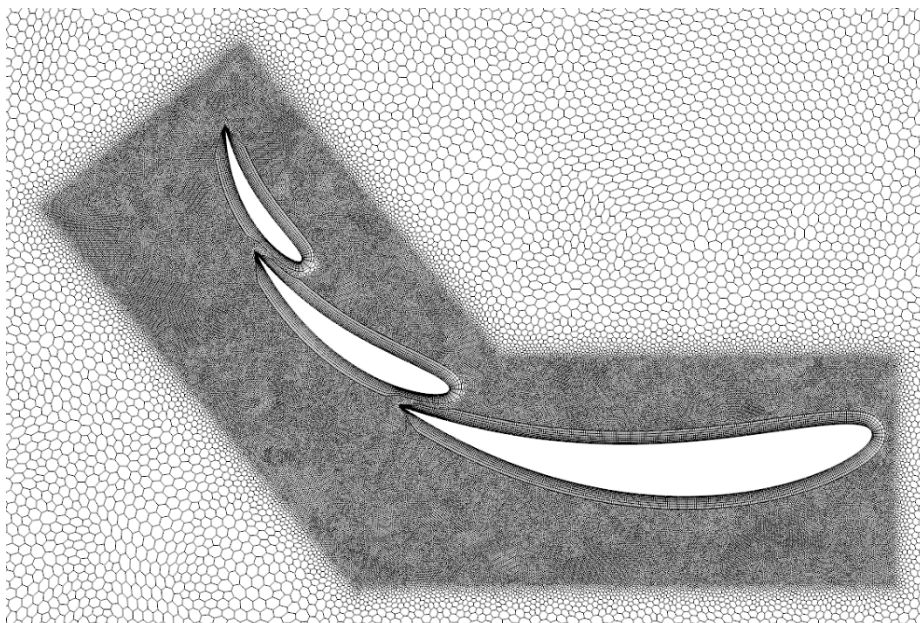
Obr. 4.12: Porovnanie umiestnenia krídel na monoposte

Na monoposte Dragon 7, pre ktorý je návrh určený sa predpokladá nahradenie trubkového rámu karbónovým monokokom.

Toto riešenie by znamenalo, že vodič by v monoposte viac „ležal“ čo by zredukovalo nepriaznivý vplyv vodičovej helmy na prúdenie na zadné krídlo.

4.4 Optimalizačný proces

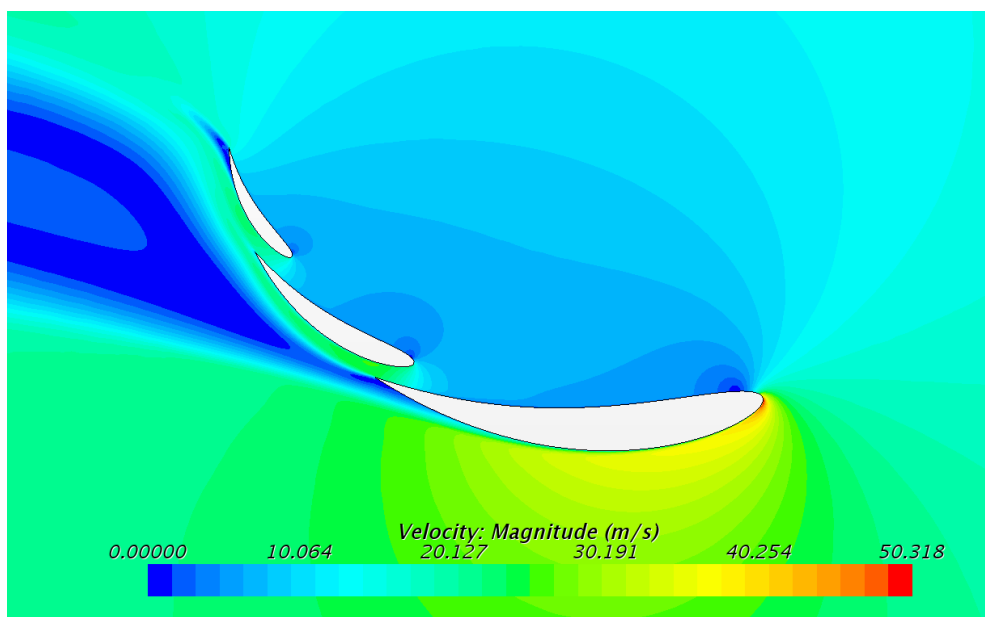
Matematický model pre výpočet 3-elementnej varianty vychádza z kalibrovaného. Nastavenie veľkostí buniek, medznej vrstvy, okrajových podmienok a fyzikálnych vlastností je zhodné. Upravená je poloha umiestnenia krídla v doméne, kde v tomto prípade sa krídlo nachádza vo vzdialenosti od zeme odpovedajúcej reálnej vzdialenosti od krídla, ktoré je na monoposte. Oblasť najdetailnejšej siete zahŕňa i priestor medzi elementami (obr. 4.13).



Obr. 4.13: Sieť 3-elementnej varianty

Výpočet trvá približne 40 minút a konvergencia nastáva asi pri 1000 iterácií. Na obrázku 4.14 je zobrazené rýchlostné pole v okolí krídla a v tabuľke 4.4 hodnoty jednotlivých koeficientov vstupnej varianty krídla.

Ako z definície účelovej funkcie vyplýva, tieto hodnoty sú predmetom optimalizácie.



Obr. 4.14: Rýchlostné pole v okolí krídla

Tab. 4.4: Hodnoty skúmaných veličín vstupnej varianty krídla

$ Cl $	3,483
$ Cl /Cd$	12,44

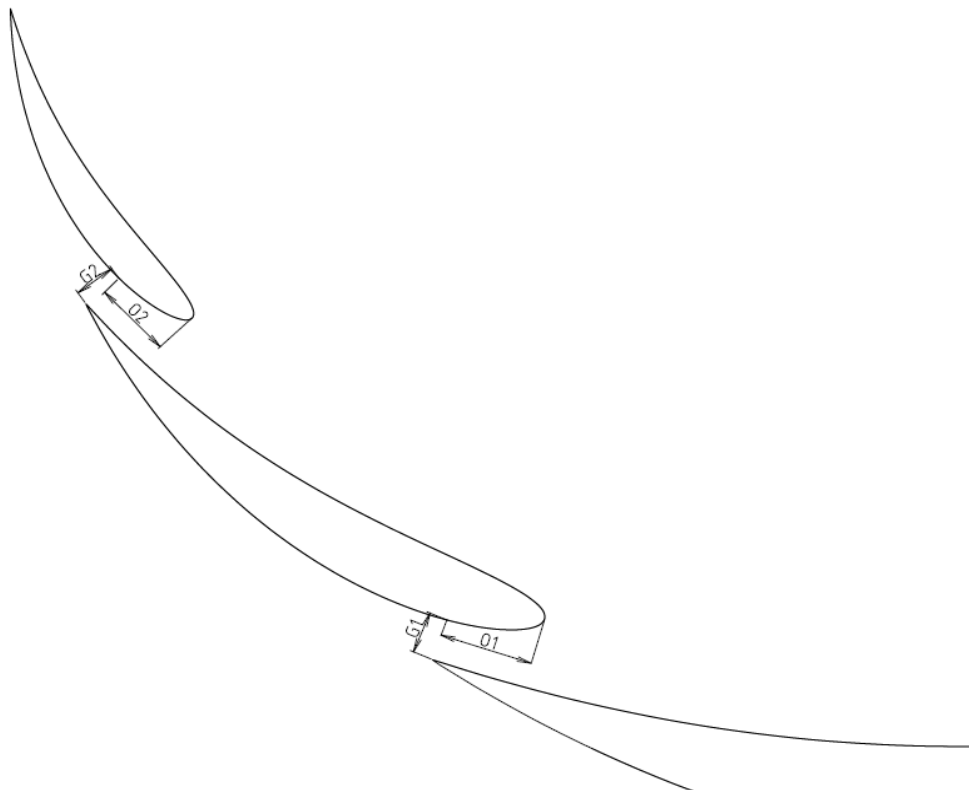
4.4.1 Voľba parametrov

Zvoliť vhodné optimalizačné parametre je kľúčové. Treba vybrať také parametre, hodnoty parametrov, rozsah a počet týchto hodnôt tak, aby potenciál zlepšenia optimalizovaných veličín bol vysoký a počet kombinácií rozumný.

Optimalizácia prebieha v troch slučkách. Predmetom prvej je vzájomná poloha elementov, ktorá obsahuje dovedna 4 parametre. V druhej slučke je optimalizovaný celkový uhol natočenia krídla a v tretej je skúmaný vplyv Gurneyho klapky na vlastnosti prúdenia.

4.4.2 Vzájomná poloha elementov

Predmetom optimalizácie v prvej slučke je vzájomná poloha elementov respektíve priemer vpísanej kružnice (G) a prekrytie (O) (obr. 4.15). Tieto parametre sú dôležitým faktorom pri optimalizácii a ich vhodne zvolené kombinácie dokážu čiastočne eliminovať separáciu prúdenia na odtokovej hrane hlavného elementu a tým výrazne zvýšiť prítlačnú silu i redukovať odpor. Za počiatočnú hodnotu parametru G je zvolených 15mm. U prekrytia sa požaduje aby malo konvexný charakter. V takom prípade je možné dosiahnuť optimálneho zrýchlenia prúdenia v priestore medzi elementami. Vstupná hodnota tohto parametru je 30mm.



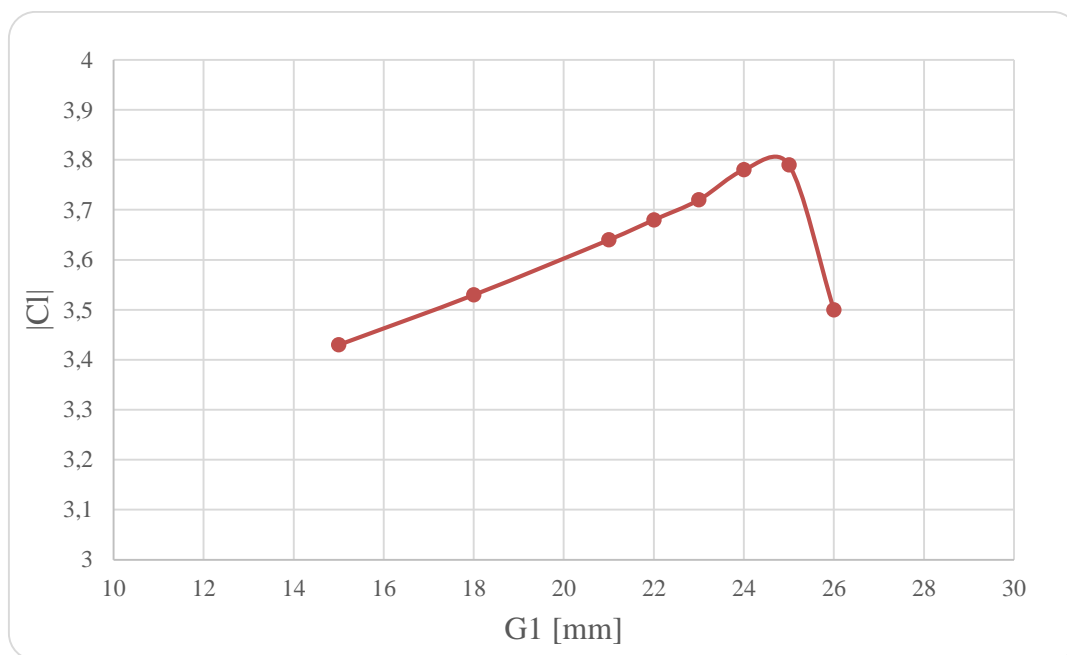
Obr. 4.15: Parametre G a O

Z každého parametru sú zvolené tri hodnoty, ktoré sú uvedené v tabuľke 4.5. Dohromady sa teda jedná o 81 kombinácií.

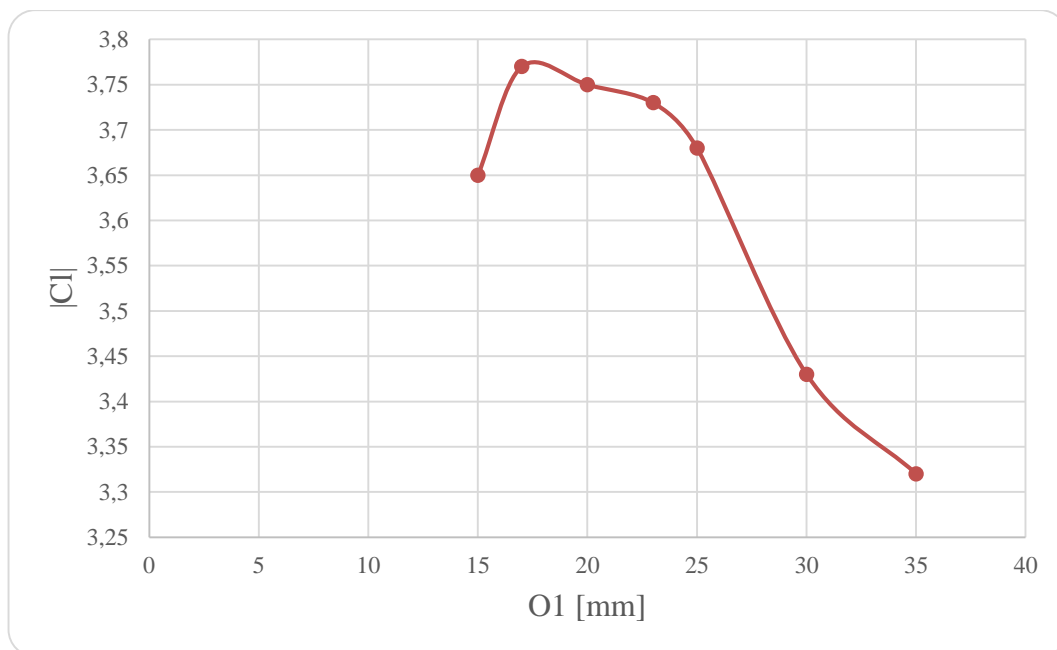
Tab. 4.5: Hodnoty jednotlivých parametrov

	[mm]
G1	15; 18; 21
O1	25; 30; 35
G2	15; 18; 21
O2	25; 30; 35

V priebehu optimalizácie sa ukázalo, že parametre G1 a O1, teda vzájomná poloha hlavného a druhého elementu majú najzásadnejší význam na hodnoty výstupných koeficientov. Tieto hodnoty sa zvyšovali so stúpajúcou hodnotou parametru G1, respektíve s klesajúcou hodnotou parametru O1. Preto treba rozsah hodnôt týchto parametrov upraviť. Je teda vykonaných niekoľko výpočtov na zistenie hraničných hodnôt parametrov G1 a O1, kedy sa ostatné parametre nemenia. Na obr. 4.16 je znázornená závislosť $|CI|$ na hodnote parametru G1 a na obr. 4.17 závislosť $|CI|$ na O1.



Obr. 4.16: Závislosť hodnoty parametru G1 na $|CI|$



Obr. 4.17: Závislosť hodnoty parametru O1 na $|Cl|$

Vzhľadom na tieto závislosti boli hodnoty parametrov upravené a pohybujú sa v oblasti, kde je koeficient $|Cl|$ maximálny.

Čo sa týka parametrov G2 a O2, ich zmeny majú v porovnaní s parametrami G1 a O1 omnoho menší vplyv na výstupné hodnoty koeficientov. Parameter G2 preukázal podobnú závislosť na Cl ako G1, takže aj rozsah jeho hodnôt je identický. Rozsah hodnôt parametru G2 sa nemení.

Nové hodnoty jednotlivých parametrov sú uvedené v tab. 4.6.

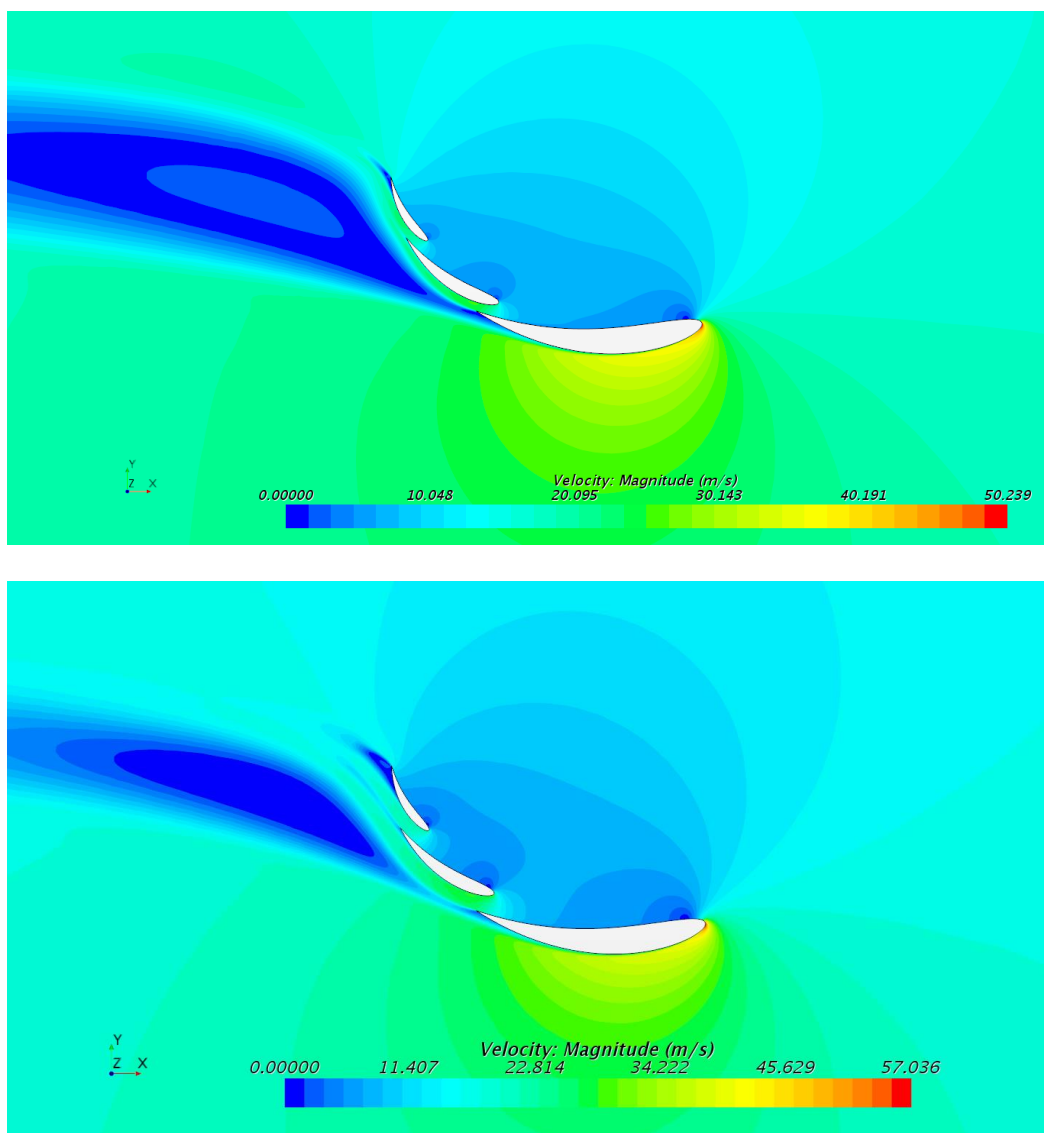
Tab. 4.6: Nové hodnoty parametrov

	[mm]
G1	20; 22; 24
O1	17; 20; 23
G2	20; 22; 24
O2	32; 35; 38

Hodnoty výstupných koeficientov všetkých 81 variant sú uvedené v prílohe č.1. Najlepšou variantou je tá s nasledujúcimi hodnotami parametrov:

- G1 = 24 mm
- O1 = 17 mm
- G2 = 22 mm
- O2 = 35 mm

Na obr. 4.18 je porovnanie charakteru prúdenia v okolí vstupnej (neoptimalizovanej) varianty a varianty po prvej optimalizačnej slučke.



Obr. 4.18: Porovnanie vstupnej (horná) a optimalizovanej varianty (dolná)

Za pozornosť stojí najmä výrazné zredukovanie úplavu vznikajúceho separáciou prúdenia na podlahovej hrane hlavného elementu.

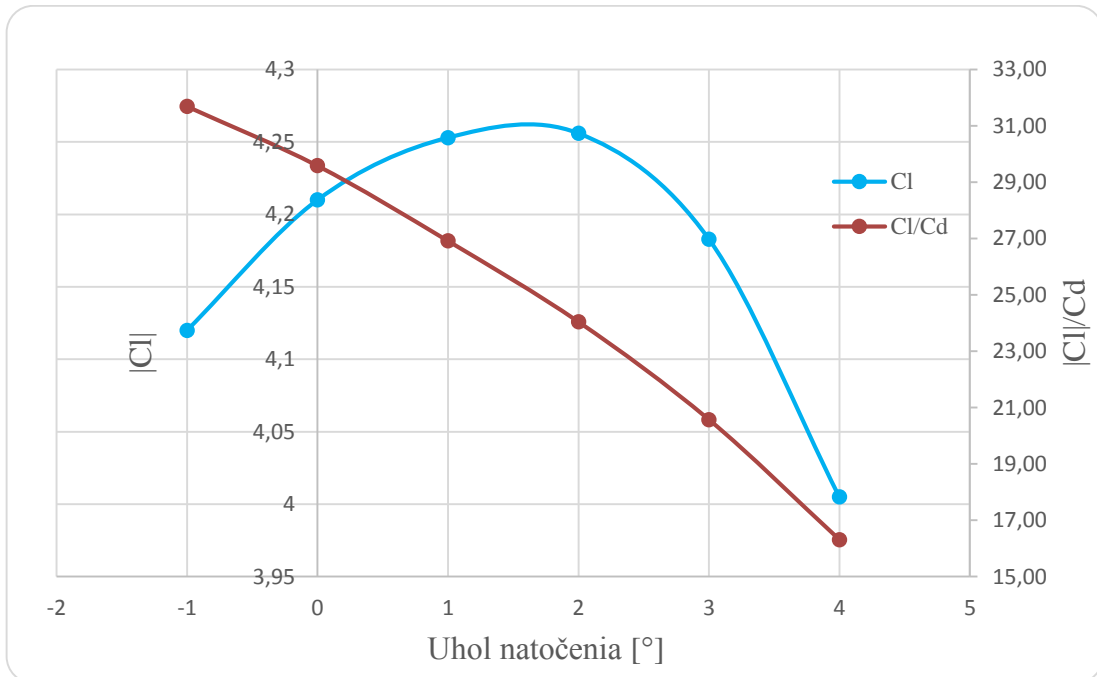
V tab. 4.7 je uvedené porovnanie optimalizovaných veličín pred a po prvej optimalizačnej slučke.

Tab. 4.7: Porovnanie hodnôt

	pred	po
$ Cl $	3,43	4,183
$ Cl /Cd$	12,25	20,58

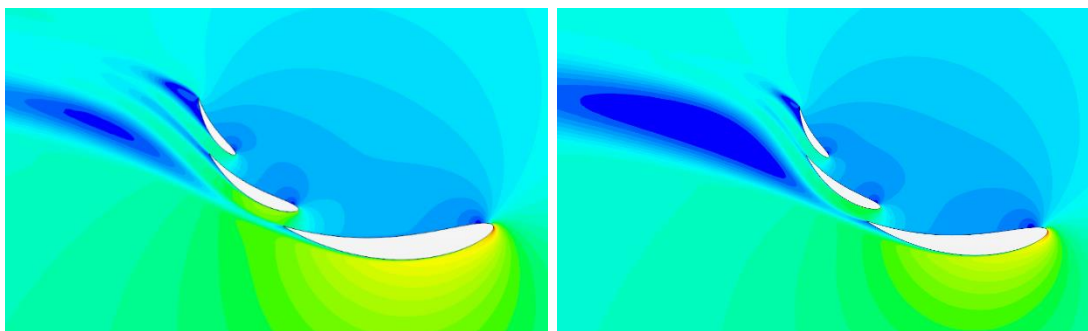
4.4.3 Uhol natočenia

V druhej slučke je optimalizovaným parametrom celkový uhol natočenia krídla. Vzájomná poloha elementov sa už nemení a osa rotácie prechádza nábehovou hranou hlavného elementu. V prvej slučke bol uhol natočenia na konštantnej hodnote troch stupňov⁶. Na obr. 4.19 je vykreslená závislosť uhla natočenia na $|Cl|$ a $|Cl|/Cd$.



Obr. 4.19: Závislosť uhla natočenia na $|Cl|$ respektíve na $|Cl|/Cd$

Z grafu je zrejmé, že najlepších vlastností krídlo dosahuje v rozmedzí od -1 do 2° uhla natočenia. Pri troch stupňoch už je separácia prúdenia na spodnej ploche hlavného elementu veľmi významná a dochádza k poklesu $|Cl|$ i $|Cl|/Cd$ (obr. 4.20). Tento rozsah umožňuje krídlo nadstaviť vzhľadom na konkrétne požiadavky pri jednotlivých dynamických disciplínach.

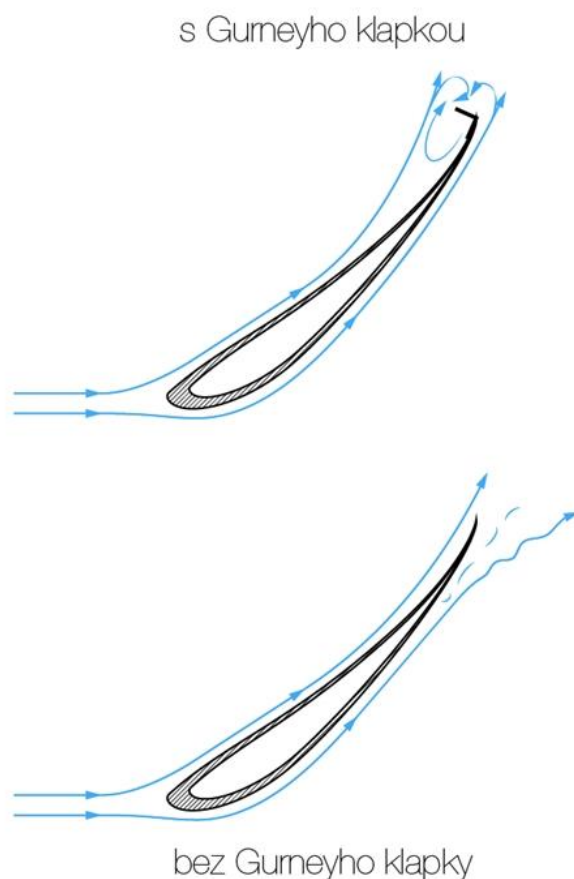


Obr. 4.20: Porovnanie krídla s 0° natočením (vľavo) a 3° natočením

⁶ Táto hodnota nie je novou nulovou hodnotou. Na vztlakovej krivke reprezentuje hodnotu troch stupňov.

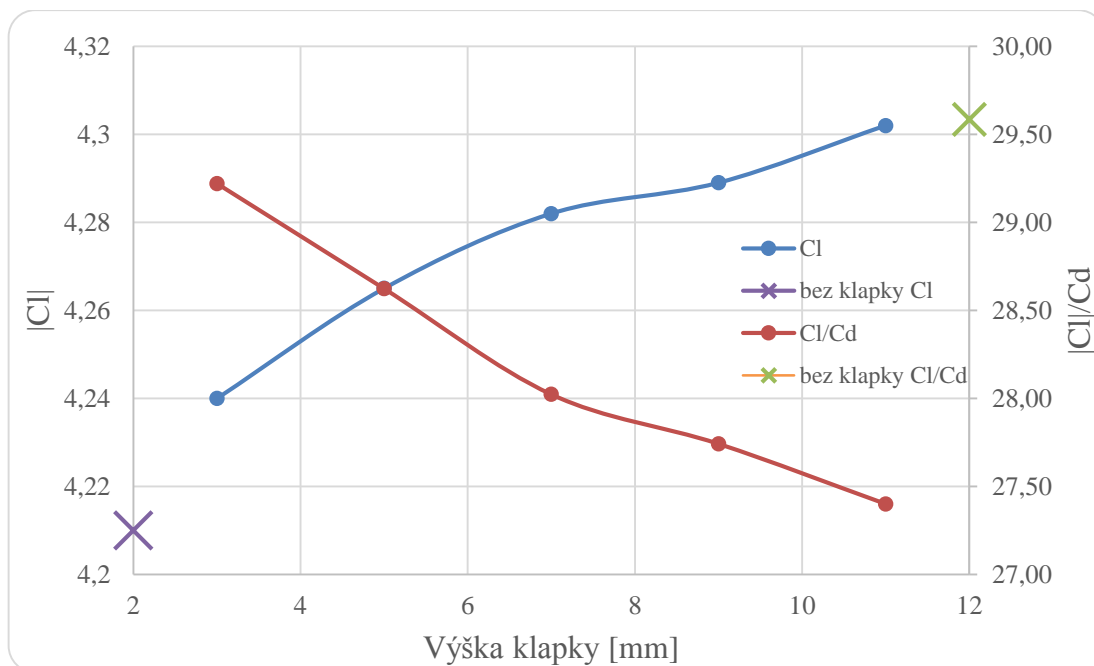
4.4.4 Gurneyho klapka

Gurneyho klapka je veľmi jednoduché zariadenie, ktoré sa skladá z obyčajného tenkého pásu materiálu pevne pripevneného kolmo k odtokovej hrane na tlakovej strane krídla. Za Gurneyho klapkou vzniká dvojica navzájom protismerne rotujúcich vírení, ktoré sa striedavo odtrhávajú a zväčšujú podtlak pod krídlom. Vďaka tomu sa prúdenie lepšie prisaje ku spodnému povrchu krídla a tým sa zamedzí jeho predčasnému odtrhnutiu.



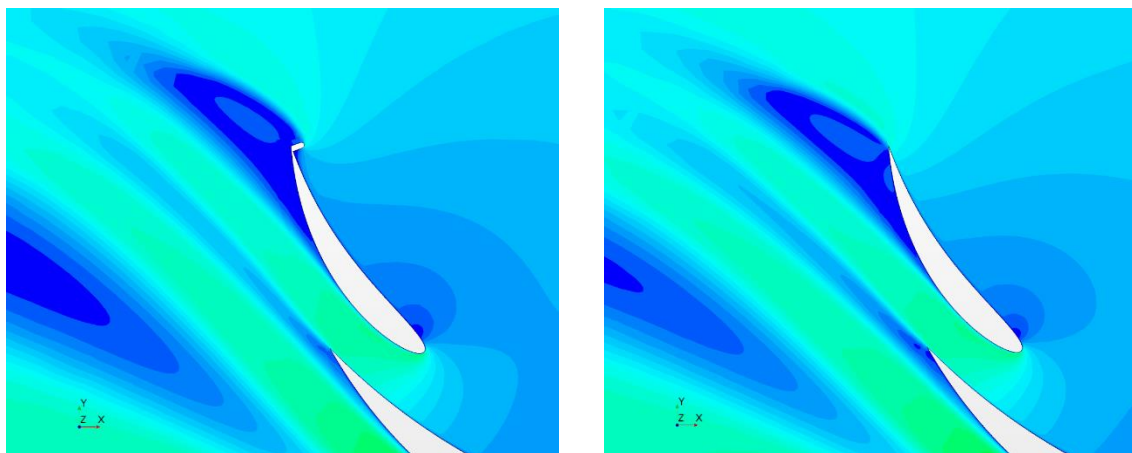
Obr. 4.21: Funkcia Gurneyho klapky [10]

Ďalším optimalizovaným prvkom je teda Gurneyho klapka, ktorá je aplikovaná na tretí element. V prvom rade je nutné potvrdiť priaznivý vplyv Gurneyho klapky. Šírka klapky vyplýva z pravidiel. Nemôže obsahovať ostré hrany ale zaoblenie s minimálnym polomerom 3 mm. Optimalizovanou veličinou je výška klapky. Uhol natočenia krídla je na hodnote 0° .



Obr. 4.22: Závislosť $|Cl|$ a $|Cl|/Cd$ na výške Gurneyho klapky

Ako z obrázku vyplýva, zavedenie Gurneyho klapky zapríčinilo zvýšenie $|Cl|$ za poklesu $|Cl|/Cd$. Na obr. 4.23 je zobrazené porovnanie prúdenia v okolí 3. elementu bez klapky a s klapkou.



Obr. 4.23: Porovnanie prúdenia v okolí 3. elementu s klapkou (vľavo) a bez

S prítomnosťou Gurneyho klapky dochádza k mierne lepšiemu priľnutiu prúdenia na podtlakovej hrane 3. elementu no kvôli výraznej separácii prúdenia na tejto hrane bez klapky, sa účinok klapky v tejto oblasti prejavuje minimálne. Naopak na vysoko tlakovej strane dochádza k zvýšeniu tlaku pred klapkou, kde je tok vzduchu nútený spomaliť. Avšak za cenu zvýšenia odporu.

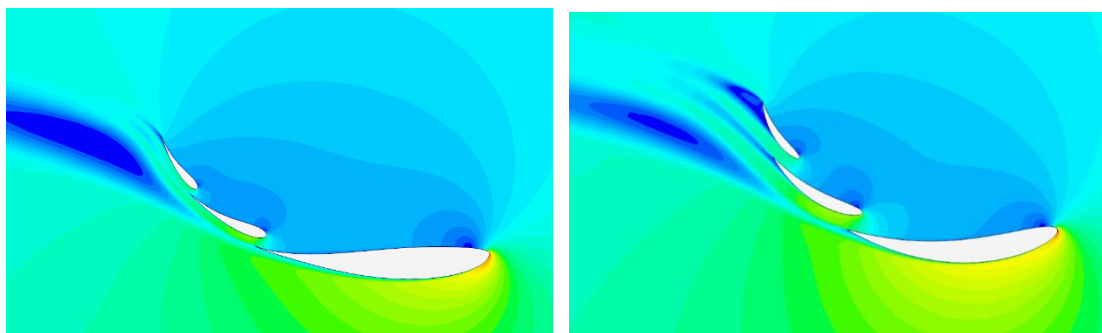
5 ZÁVER

Cieľom tejto bakalárskej práce bol aerodynamický návrh prítlačných krídel, ktoré budú použité na nasledujúcej generácii monopostu Dragon tímu TU Brno Racing. Bližšia špecifikácia cieľa bola stanovená počas riešenia návrhu. Tá určila za prioritu návrh profiláže zadného krídla. Dôvodom prečo sa táto práca nezaobrá i návrhom predného krídla je jednak časová náročnosť, ale hlavne fakt, že predné krídlo má vplyv na aerodynamiku celého vozu. Keďže monopost, pre ktorý je návrh určený ešte nie je vo vývoji, je nemožné navrhnuť predné krídlo pre jeho požiadavky.

Zadné krídlo bolo optimalizované v niekoľkých slučkách. Zámerom bolo zvýšenie výstupnej hodnoty koeficientu prítlaku ($|C_l|$) a zvýšenie pomeru prítlak/odpor ($|C_l|/C_d$). V prvej slučke došlo k zlepšeniu $|C_l|$ o približne 22% a $|C_l|/C_d$ presne o 68% v porovnaní so vstupnou variantou.

Výsledky druhej a tretej slučky umožňujú do budúcnosti krídlo nakonfigurovať podľa požiadaviek.

Ak porovnáme 2D sekciu krídla nového a súčasného (Dragon 6), tak došlo taktiež k výraznému zlepšeniu (obr. 5.1 a tab. 5.1).



Obr. 5.1: Porovnanie krídla súčasného (vľavo) a krídla pre novú generáciu (0°)

Tab. 5.1: Porovnanie koeficientov krídel

	$ C_l $	$ C_l /C_d$
Súčasná gen.	3,52	18,11
Nová gen. ⁷	4,183	20,58
Zlepšenie [%]	18,8	13,6

V skutočnosti, ak vezmeme do úvahy všetky efekty 3-rozmerného prúdenia sú tieto koeficienty výrazne nižšie, no podiel zlepšenia by mal byť približne rovnaký.

Z vizualizácií je zrejmé, že potenciál tohto návrhu je ešte vyšší. Na treťom elemente dochádza ku skorému odtrhnutiu prúdenia a krídlo stráca na efektívite. Na tejto oblasti je nutné ešte popracovať, napríklad výmenou profilu tretieho elementu za profil z menším zakrivením. Celkovo je však toto krídlo veľmi dobrým štartom do novej éry TU Brno Racing.

⁷ 0° natočenia a bez Gurneyho klapky

ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

- [1] KATZ, Joseph. *Race Car Aerodynamics: Designing for Speed*. 1. vyd. Cambridge, MA, USA: Bentley Publishers. 1995, 270 s. ISBN 0-8376-0142-8.
- [2] SAE. *FSAE Rules*. Warrendale, PA, 2016 [online]. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: http://students.sae.org/cds/formulaseries/rules/2015-16_fsae_rules.pdf
- [3] FRYŠTÁK, Lukáš. *Návrh přitlačných křídel pro vůz Formule Student/SAE*: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav, 2014. 86 s. Vedoucí práce byl Ing. Robert Popela, PhD.
- [4] DOUPNÍK, P. *Využití optimalizačních metod při návrhu transsonického křídla s implementací základních konstrukčně pevnostních omezení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 54 s. Vedoucí disertační práce prof. Ing. Antonín Pištěk, CSc.
- [5] ABBOTT, Ira H., Albert E. VON DOENHOFF a Louis S. STIVERS JR. *Summary of airfoil data* [online]. 1945, 261 s. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19930090976.pdf>
- [6] *Airfoil Database* [online]. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://airfoiltools.com/search/index>
- [7] SCHLEGEL, Fabrice. *Optimize NACA Airfoil Designs with a Simulation App* [online]. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <https://www.comsol.com/blogs/optimize-naca-airfoil-designs-with-a-simulation-app/>
- [8] TU BRNO RACING. *Dragon 5 – Design Book: Presentation materials*. Brno: TU Brno Racing, 2015.
- [9] TU BRNO RACING. *Dragon 4 – Design Book: Presentation materials*. Brno: TU Brno Racing, 2014.
- [10] KEZSELI, Mário. *Gurneyho klapka: jednoduchý vynález, který změnil nejen motorsport* [online]. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://f1sport.autorevue.cz/clanek/gurneyho-klapka-jednoduchy-vynalez-ktery-zmenil-nejen-motorsport>
- [11] *F1 Aerodynamik: Luft-Nummer* [online]. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.freenet.de/archiv/f1aerodynamikluftnummer2609824765490.html>
- [12] *CFD Computational Fluid Dynamics* [online]. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.formula1-dictionary.net/cfd.html>

- [13] Computational fluid dynamics. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Computational_fluid_dynamics
- [14] *TU Brno Racing* [online]. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.tubnracing.cz/>
- [15] *Global Formula Racing* [online]. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.global-formula-racing.com/>
- [16] *Monash Motorsport* [online]. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.monashmotorsport.com/>
- [17] *Diffusers / Engineering basics / Aerodynamics* [online]. [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: <http://www.racecar-engineering.com/technology-explained/diffusers-engineering-basics-aerodynamics/>

ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A SYMBOLOV

A_{ref}	[m ²]	priemet čelnej plochy vozidla
C_d	[1]	koeficient odporu
C_l	[1]	koeficient vztlaku
C_{lF}	[1]	koeficient vztlaku prednej nápravy
C_{lR}	[1]	koeficient vztlaku zadnej nápravy
V_{∞}	[m s ⁻¹]	Rýchlosť vzdialeného prúdu vzduchu
Re	[1]	Reynoldsove číslo
ν	[m ² s]	Kinematická viskozita
ρ	[kg/m ³]	Hustota vzduchu
c	[m]	Hĺbka profilu

SAE Society of Automotive Engineers

CFD Computational Fluid Dynamics

ZOZNAM OBRÁZKOV

1	Princíp funkcie prítlačného krídla [17].	13
1.1	Monopost z roku 2013 austrálskeho tímu Monash Motorsport [16]	15
1.2	Dragon 4 [14]	15
1.3	Dragon 5 [14]	16
1.4	Monopost tímu GFR z roku 2015 [15]	16
1.5	Dragon 6 [14]	16
1.6	Vplyv jednotlivých komponentov na úsporu času na kolo [8]	17
2.1	Vizualizácia prúdnic a tlaku na monoposte F1 prostredníctvom CFD [11]	19
3.1	Aerodynamické prvky Dragona 4 [9]	21
3.2	Geometria krídel monopostu Dragon 4 [3]	22
3.3	Rýchlostné pole v okolí krídla [3]	22
3.4	Predné krídlo Dragona 4 [8]	23
3.5	Rýchlostné pole v rovine symetrie monopostu [8]	23
3.6	Aerodynamické prvky Dragona 5 [9]	24
3.7	Rýchlostné pole v okolí 2D sekcie zadného krídla	24
3.8	Zadné krídlo Dragona 5 [8]	25
3.9	Prvá iterácia predného krídla Dragona 5 [8]	25
3.10	Finálna podoba predného krídla Dragona 5 [8]	26
3.11	Pole koeficientu tlaku v oblasti nosu v rovine symetrie(vľavo Dragon 5) [9] . .	26
3.12	Rýchlostné pole vo vyznačenom reze	27
3.13	Dragon 6 [14]	28
3.14	Zadné krídlo Dragona 6	28
3.15	Predné krídlo Dragona 6	29
3.16	Porovnanie tlaku na povrchu monopostu s krídlom v 0° (ľavá polka) a 8°	29
4.1	Doména a priradené okrajové podmienky	32
4.2	Rozdelenie siete	33
4.3	Závislosť výstupnej hodnoty $ C_l $ na veľkosti bunky v blízkom okolí profilu . .	34
4.4	Finálna sieť	35
4.5	Detail siete v okolí profilu a pohľad na prizmatické vrstvy	35
4.6	Súradnicový systém priradený k návrhovému parametru rotácia okolo osi z . .	36
4.7	Porovnanie vztlačkových kriviek [5]	37
4.8	Porovnanie polár [5]	38

4.9	Parametre riadiace tvar NACA profilu [7]	39
4.10	Geometria krídla v boxe danom pravidlami	40
4.11	Porovnanie profiláží	41
4.12	Porovnanie umiestnenia krídel na monoposte	41
4.13	Sieť 3-elementnej varianty	42
4.14	Rýchlostné pole v okolí krídla	42
4.15	Parametre G a O	43
4.16	Závislosť hodnoty parametru G1 na $ Cl $	44
4.17	Závislosť hodnoty parametru O1 na $ Cl $	45
4.18	Porovnanie vstupnej (horná) a optimalizovanej varianty (dolná)	46
4.19	Závislosť uhla natočenia na $ Cl $, respektíve na $ Cl /Cd$	47
4.20	Porovnanie krídla s 0° natočením (hore) a 3° natočením	47
4.21	Funkcia Gurneyho klapky [10]	48
4.22	Závislosť $ Cl $ a $ Cl /Cd$ na výške Gurneyho klapky	49
4.23	Porovnanie prúdenia v okolí 3. elementu s klapkou (hore) a bez	49
5.1	Porovnanie krídla súčasného (vľavo) a krídla pre novú generáciu (0°)	51

ZOZNAM TABULIEK

3.1	Porovnanie aerodynamických veličín Dragona 4 a 5	27
3.2	Rozloženie prítlaku na nápravách	29
4.1	Nadstavenie fyzikálnych vlastností	33
4.2	Základné parametre siete	34
4.3	Hodnoty parametrov NACA profilu	39
4.4	Hodnoty skúmaných veličín vstupnej varianty krídla	43
4.5	Hodnoty jednotlivých parametrov	44
4.6	Nové hodnoty parametrov	45
4.7	Porovnanie hodnôt	46
5.1	Porovnanie koeficientov krídel	51

ZOZNAM PRÍLOH

A	Výpočet prvej optimalizačnej slučky	61
A.1	Hodnoty $ C $ jednotlivých kombinácií	61

A VÝPOČET PRVEJ OPTIMALIZAČNEJ SLUČKY

A.1 Hodnoty $|CI|$ jednotlivých kombinácií

11=20mm	21=17mm	31=20mm	41=32mm
12=22mm	22=20mm	32=22mm	42=35mm
13=24mm	23=23mm	33=24mm	43=38mm

G1	O1	G2	O2	$ CI $
11	21	31	41	4,02
11	21	31	42	4,023
11	21	31	43	4,03
11	21	32	41	4,05
11	21	32	42	4,04
11	21	32	43	4,05
11	21	33	41	4,06
11	21	33	42	4,07
11	21	33	43	4,065
11	22	31	41	4,02
11	22	31	42	4,03
11	22	31	43	4,04
11	22	32	41	4,025
11	22	32	42	4,05
11	22	32	43	4,05
11	22	33	41	4,04
11	22	33	42	4,063
11	22	33	43	4,065
11	23	31	41	3,98
11	23	31	42	3,96
11	23	31	43	3,97
11	23	32	41	3,97
11	23	32	42	3,974
11	23	32	43	3,985
11	23	33	41	3,987
11	23	33	42	3,997
11	23	33	43	4,006
12	21	31	41	4,07
12	21	31	42	4,08
12	21	31	43	4,085
12	21	32	41	4,09
12	21	32	42	4,092
12	21	32	43	4,086
12	21	33	41	4,107
12	21	33	42	4,109
12	21	33	43	4,105

12	22	31	41	4,033
12	22	31	42	4,053
12	22	31	43	4,063
12	22	32	41	4,04
12	22	32	42	4,07
12	22	32	43	4,071
12	22	33	41	4,078
12	22	33	42	4,09
12	22	33	43	4,073
12	23	31	41	3,991
12	23	31	42	3,998
12	23	31	43	4,006
12	23	32	41	4
12	23	32	42	4,014
12	23	32	43	4,025
12	23	33	41	4,031
12	23	33	42	4,023
12	23	33	43	4,036
13	21	31	41	4,134
13	21	31	42	4,137
13	21	31	43	4,14
13	21	32	41	4,148
13	21	32	42	4,183
13	21	32	43	4,154
13	21	33	41	4,166
13	21	33	42	4,157
13	21	33	43	4,121
13	22	31	41	4,087
13	22	31	42	4,091
13	22	31	43	4,103
13	22	32	41	4,1
13	22	32	42	4,114
13	22	32	43	4,107
13	22	33	41	4,121
13	22	33	42	4,138
13	22	33	43	4,125
13	23	31	41	4,066
13	23	31	42	4,071
13	23	31	43	4,081
13	23	32	41	4,062
13	23	32	42	4,098
13	23	32	43	4,078
13	23	33	41	4,079
13	23	33	42	4,115
13	23	33	43	4,088